

6 Materielle Umwelt und Gesundheit

In diesem Kapitel befassen wir uns mit der materiellen Umwelt der Menschen und den Auswirkungen, die sie auf die menschliche Gesundheit haben kann. Vor allem in den letzten beiden Jahrhunderten hat sich unsere Umwelt durch Bevölkerungswachstum, Industrialisierung und Urbanisierung stark verändert, und sie verändert sich laufend weiter.

Im ersten Abschnitt widmen wir uns dem sich ändernden Klima und seinen ökologischen und gesundheitlichen Folgen. Dazu diskutieren wir die politischen Aspekte, die in diesem Zusammenhang von großer Bedeutung sind, einschließlich der Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Im zweiten Abschnitt gehen wir auf die Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung ein, die von zentraler Bedeutung für die Gesundheit der Bevölkerung sind. Der nächste Abschnitt widmet sich der Verschmutzung des Bodens, der Grundlage des Lebens auf dem Festland und wesentliche Basis der Nahrungsmittelproduktion und des Wasserhaushaltes. Danach beschäftigen wir uns mit der Luftverschmutzung. Wir betrachten die wichtigsten Schadstoffquellen, die gesundheitlichen Auswirkungen der Luftverschmutzung und mögliche präventiven Maßnahmen. In einem weiteren Abschnitt erörtern wir die Begriffe und Maßeinheiten rund um ionisierende und nicht ionisierende Strahlung, die häufigsten Strahlungsquellen, gesundheitlichen Auswirkungen und präventive Maßnahmen. Abschließend definieren wir Schall und Lärm, schauen uns die wichtigsten Lärmquellen an und gehen auf die Bedeutung der durch Lärm ausgelösten Erkrankungen und ihre Prävention ein.

Schweizerische Lernziele: CPH 42-45, CPH 58, CPH 63

6.1 Klima

Claudia Kuehni, Hubertus Fischer, Adrian Schilt, Matthias Egger

Der *Klimawandel* stellt die Menschen und Institutionen, die sich mit der globalen Gesundheit im 21. Jahrhundert beschäftigen, vor neue Herausforderungen. Zum einen führen immer häufiger auftretende Extremereignisse wie Hitzewellen, Stürme und Überschwemmungen zu *direkten Gesundheitsbeeinträchtigungen*. Andererseits kann es durch ökologische Veränderungen und soziale Instabilität zu einer *indirekten Beeinflussung der Gesundheit* kommen. So führen schon jetzt klimatische Veränderungen in bestimmten Gebieten der Erde zu akuten Nahrungsmittelknappheiten. Infolge des Hungers sind die Menschen in ihrer Abwehr geschwächt und dadurch anfälliger für Infektionskrankheiten

6.1.1 Natürliche und anthropogene Klimaveränderung

Seit der Entstehung der Erde verändert sich ihr Klima. Beeinflusst wird es v. a. durch die elliptische Umlaufbahn der Erde um die Sonne und die Neigung der Erdoachse gegenüber der Erdbahn. Dadurch kommt es in regelmäßigen Abständen zu einem Wechsel von Warm- und Kaltzeiten (*Milanković-Zyklen*). Andere natürliche Ursachen

von Klimaschwankungen sind Veränderungen der Sonnenaktivität sowie die Kontinentalverschiebung und der Vulkanismus auf der Erde. Diese natürlichen Faktoren führten in den vergangenen 1.000 Jahren jedoch nur zu kurzfristigen Schwankungen der globalen Durchschnittstemperatur um etwa 1 °C. Darüber hinaus gibt es auf längeren Zeitskalen (Tausende bis Millionen von Jahren) auch größere globale Schwankungen, die aber viel langsamer vonstattengehen als der derzeitige menschgemachte Wandel. Seit den 1970er-Jahren beobachtet man nun eine Erwärmung der Atmosphäre, die mit natürlichen Klimaschwankungen nicht mehr erklärbar ist. So gehören die ersten vierzehn Jahre des 21. Jahrhunderts zu den fünfzehn wärmsten Jahren seit Beginn der Messung der globalen Jahrestemperaturen Mitte des 19. Jh. Zudem waren die globale Durchschnittstemperaturen der Jahre 2015 und 2014 die höchsten bzw. zweithöchsten, die jemals gemessen wurden. Zwischen 1880 und 2012 ist die jährliche globale Durchschnittstemperatur um 0,85 °C angestiegen. In Deutschland stieg die mittlere Lufttemperatur zwischen 1901 und 2008 um gut 1 °C an. In der Schweiz haben sich die seit Beginn der Industrialisierung (1864) registrierten Durchschnittstemperaturen bis zum Jahr 2015 sogar um ca. 1,9 °C erhöht. Dagegen sind beim mittleren Niederschlag aufgrund der großen jährlichen Schwankungen bisher noch kaum Veränderungen nachweisbar. Es zeigt sich jedoch eine Tendenz zu mehr Sommer- und Hitzetagen sowie ein signifikanter Rückgang bei der Zahl der Frosttage. Die Nullgradgrenze im Winter ist seit den 1960er-Jahren um ca. 300 m angestiegen. Hauptursache dieser anthropogenen Klimaerwärmung ist die Verstärkung des Treibhauseffekts durch umfangreiche Waldrodungen und v.a. durch den Ausstoß von Treibhausgasen.

Mechanismus der anthropogenen Klimaerwärmung

Die Temperatur auf der Erdoberfläche ist in erster Linie von der Sonnenstrahlung abhängig. Wie jeder feste Körper sendet die Erde ihrerseits Infrarotstrahlung in den Weltraum. Ein Teil dieser Infrarotstrahlung wird durch die in der Atmosphäre enthaltenen *Treibhausgase* absorbiert und zur Erde zurück gelenkt. Dieser natürliche Treibhauseffekt hebt die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche von –18 °C auf +15 °C an und ermöglicht so das Leben auf der Erde. Die wichtigsten natürlichen Treibhausgase sind Wasserdampf (H₂O), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und Ozon (O₃). Messungen an Eisbohrkernen zeigen, dass sich die CO₂-Konzentration der Atmosphäre während der letzten 800.000 Jahre zwischen ca. 175 und 300 ppm (ppm = **p**arts **p**er **m**illion, d.h. ein Mol CO₂ pro 1 Mio. Mole Luft) bewegte. Seit etwa 1850 zeigt sich ein deutlicher Anstieg der CO₂-Konzentration (Abb. 6.1), welcher unverändert im 21. Jahrhundert weitergeht. Im Jahr 2016 lag die mittlere globale CO₂-Konzentration in der Atmosphäre knapp über 400 ppm. Eindrücklich war auch der Anstieg in den letzten Jahrzehnten beim Lachgas sowie beim Methan, bei dem sich die Konzentration in diesem Zeitraum mehr als verdoppelt hat.

Das wichtigste anthropogene Treibhausgas CO₂ entsteht bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Herstellung von Zement. Weltweit werden hierdurch

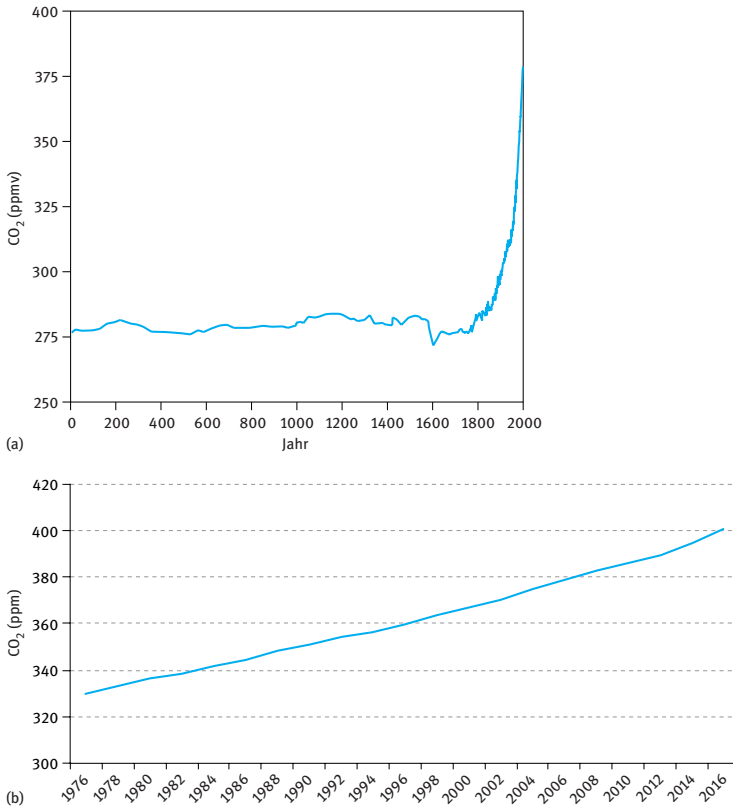


Abb. 6.1: a) Änderung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre in den letzten 2.000 Jahren. Die der Abbildung zugrunde liegenden Daten basieren auf der Untersuchung von Eisbohrkernen sowie auf atmosphärischen Messungen (Quelle: modifiziert nach MacFarling Meure C et al. The Law Dome CO₂, CH₄ and N₂O Ice Core Records Extended to 2000 Years BP. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L14810, doi: 10.1029/2006GL026152, 2006).
 b) Entwicklung der CO₂-Messwerte in Tasmanien seit 1976. Angegeben sind jeweils die Juni-Messwerte eines Jahres. Die Messstation auf Cape Grim an der Westküste Tasmaniens gehört zu den drei führenden Luftreinhalte-Stationen im Netzwerk der World Meteorological Organization-Global Atmosphere Watch (WMO-GAW; s. <http://www.csiro.au/greenhouse-gases/>).

etwa 65 % der Treibhausgasemissionen verursacht (D: 86,1 %, CH: 85,0 %, A: 74,5 %). CO₂-Emissionen entstehen zudem durch Nutzung von Wald und Boden (etwa 11 %). Weitere bedeutende anthropogene Treibhausgase sind Methan (etwa 16 %) und Lachgas (etwa 6 %), die z. B. als Folge der Viehhaltung und Düngung im Rahmen einer intensivierten Landwirtschaft, bei Nassreisenanbau und Biomassenverbrennung sowie in Mülldeponien entstehen. Synthetische Treibhausgase wie fluoridierte Kohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid sind nur für etwa 2 % der Emissionen verantwortlich. Bei Methan, Lachgas und synthetischen Treibhausgasen ist zu berücksichtigen, dass diese pro Molekül ein wesentlich größeres Erwärmungspotenzial als CO₂ haben.

Anthropogene Treibhausgase wurden in den vergangenen Jahrzehnten mehrheitlich von den Industrienationen emittiert. Die Auswirkungen der Klimaveränderung zeigen sich hingegen weltweit. Auch in Europa sind Gesundheitsfolgen nachweisbar.

6.1.2 Klimatische und ökologische Folgen der globalen Erwärmung

Zu den Auswirkungen des Klimawandels auf **Atmosphäre** und **Hydrosphäre** (ober- und unterirdische Wasservorkommen) der Erde gehören:

- die Erhöhung des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes
- der Anstieg der Meeresspiegel (um insgesamt 19 cm zwischen 1901 und 2010; zwischen 1993 und 2010 betrug die Anstiegsrate 3,2 cm/Jahrzehnt)
- das Abschmelzen der Gebirgsgletscher, die Abnahme der Schneebedeckung sowohl auf der Nord- als auch auf der Südhalbkugel und das vermehrte Schmelzen der Eisschilde der Antarktis und auf Grönland
- regional unterschiedliche Veränderungen der Niederschläge (Zunahme in Nordeuropa und Nordamerika, Reduktion im Mittelmeerraum, der Sahelzone und im südlichen Afrika)
- die Zunahme von Extremereignissen, wie z. B. Hitzewellen, Starkregen und Überschwemmungen

Auch auf die **Biosphäre** wirkt sich der Klimawandel in vielfältiger Weise aus. Von Bedeutung sind hier u. a. die Versauerung der Ozeane durch eine verstärkte CO₂-Aufnahme sowie die Zunahme von Hitze- und die Abnahme von Kältephasen. Dies trägt nicht nur zu Veränderungen in den Ökosystemen bei, durch die die Artenvielfalt schwindet. Es kommt auch zu einer Nettoerhöhung der globalen landwirtschaftlichen Produktion (Reduktion in Tropen, leichte Erhöhung in der nördlichen Hemisphäre). Allerdings gibt es auch in der nördlichen Hemisphäre Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft. So wurden u. a. für Deutschland bereits Veränderung der Wachstumsperioden sowie eine Zunahme von klimatischen Extremereignissen festgestellt. Darüber hinaus ändern sich die Verbreitungsgebiete von Krankheitserregern und die Infektiosität der Erreger (vgl. Kap. 9.3).

6.1.3 Gesundheitsfolgen

Die *Gesundheitsfolgen der Klimaerwärmung* lassen sich untergliedern in

- **direkte (primäre) Folgen**
- erhöhte Mortalität und Morbidität durch eine Zunahme der Extremereignisse wie Hitzewellen, Stürme, Überschwemmungen, Waldbrände

– **indirekte (sekundäre und tertiäre) Folgen**

- ökologisch bedingt: reduzierte Nahrungsmittelversorgung als Folge von Dürren oder Überschwemmungen, Zunahme von Infektionskrankheiten und Allergien in vielen Gebieten (s. u.)
- sozial bedingt: Hungersnöte, Kriege, Flüchtlingswellen, Entwicklungsstagnation in den betroffenen Gebieten (s.a. Kap. 10.2.7)

Globale Gesundheitsfolgen

Die Folgen der Klimaerwärmung auf die globale Gesundheit sind in Tab. 6.1 zusammengestellt.

Tab. 6.1: Direkte und indirekte Gesundheitsfolgen des Klimawandels auf die globale Gesundheit.

Ursachen	Gesundheitsfolgen
Direkte (primäre) Folgen	
Mehr Hitzewellen, weniger Kältetage	Erhöhtes Risiko für <ul style="list-style-type: none"> – Hitzebedingte Sterblichkeit, insbesondere bei älteren Menschen, Kleinkindern, chronisch Kranken und gesellschaftlich Isolierten – Rückgang kältebedingter Sterblichkeit (kompensiert die Zahl der Hitzetoten nicht)
Zunahme von Extremereignissen (Starkregen, Stürme, Überschwemmungen)	Erhöhtes Risiko für <ul style="list-style-type: none"> – Todesfälle und Verletzungen – durch Wasser und Nahrungsmittel übertragene Krankheiten – Posttraumatische Belastungsstörungen – Infektions-, Atemwegs- und Hauterkrankungen
Indirekte (sekundäre) Folgen, vermittelt durch ökologische Veränderungen	
Ausbreitung von Dürregebieten, Reduktion der landwirtschaftlichen Produktivität, verändertes Verbreitungsgebiet und veränderte Infektiosität von Krankheitserregern und Vektoren	Erhöhtes Risiko für <ul style="list-style-type: none"> – Nahrungsmittel- und Wasserknappheit; Mangel- und Fehlernährung; kindliche Entwicklungsverzögerungen – durch Wasser oder Nahrungsmittel übertragene Krankheiten – Infektionskrankheiten (v. a. armutsassoziiert): Durchfälle, Malaria, Dengue-Fieber
Indirekte (tertiäre) Folgen, vermittelt durch vermehrte soziale Instabilität	
Zunahme von Kriegen, Flüchtlingsströmen und Hungersnöten, Entwicklungsstagnation in den betroffenen Gebieten	Erhöhtes Risiko für <ul style="list-style-type: none"> – Todesfälle, Verletzungen, Behinderungen – Alle armutsbedingten Krankheiten – Posttraumatische Belastungsstörungen

Gesundheitsfolgen für die Schweiz, Österreich und Deutschland

Die auffälligste, klimabedingte Gesundheitsfolge ist hierzulande eine *erhöhte Mortalität* während der nun häufiger auftretenden *Hitzewellen*. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Gesamtmortalität verläuft U-förmig, mit einer erhöhten Sterblichkeit bei niedrigen und hohen Temperaturen. Es gibt jedoch auch regionale Unterschiede im Hinblick auf die Temperatur, bei der die Mortalität am niedrigsten ist. Oberhalb dieses Schwellenwertes kann es pro °C zu einem Anstieg der Mortalität um 0,2 % bis 5,5 % kommen. So führte die Hitzewelle im Jahr 2003 in der Schweiz z. B. zu 1.000, in Deutschland zu 7.000 zusätzlichen Todesfällen, ohne dass danach eine Phase erniedrigter Mortalität folgte. Die Zahl lag damit höher als die der Verkehrstoten in diesem Jahr (vgl. Kap. 8.9.1). Lange Hitzewellen (> 5 Tage) haben dabei einen stärkeren Effekt als kurze. Betroffen sind v. a. ältere Menschen und Kleinkinder, Kranke sowie Personen, die bestimmte Medikamente (z. B. Diuretika) einnehmen, Menschen mit niedrigem Einkommen und sozial isolierte Personen. Durch einen Rückgang der körperlichen und geistigen Leistungsfähigkeit im Beruf führen Hitzewellen auch zu ökonomischen Einbußen. Unklar ist bisher, wie rasch sich die Menschheit an höhere Temperaturen anpassen kann.

Auch die häufigere Zahl an *Überschwemmungen*, *Murgängen* (*Schlamm- und Geröll-Lawinen*) und *Stürmen* führt zu zusätzlichen Todesfällen, Verletzungen und psychischen Beeinträchtigungen. Zwar sind solche Todesfälle seltener als die infolge von Hitzewellen, die verlorenen Lebensjahre (DALYs; vgl. Kap. 10.1.2) bewegen sich bei beiden Ursachen aber in einer ähnlichen Größenordnung, da bei den Extremereignissen oft jüngere Menschen betroffen sind.

Durch höhere Umgebungstemperaturen vermehren sich Erreger in Lebensmitteln schneller. Entsprechend häufiger kann es zu Lebensmittelvergiftungen, z. B. durch Salmonellen und Kolibakterien, kommen. Die Infektionshäufigkeit an Krankheiten, die durch *Lebensmittel und Wasser übertragen* werden, steigt in der Regel linear mit der mittleren Jahrestemperatur an.

Die Klimaerwärmung kann infolge steigender Konzentrationen an biogenen Luftpartikeln (z. B. Pollen und Pilzsporen) und deren Transport durch Extremereignisse (Unwetter) auch zu einer Zunahme an *Atemwegserkrankungen* und *Allergien* führen.

In Mittel- und Südeuropa sind Krankheiten, die von Tieren über Vektoren auf den Menschen übertragen werden, auf dem Vormarsch. Ein Beispiel hierfür ist das West-Nil-Fieber in der Camargue (Südfrankreich), in Griechenland und Rumänien. Höhere Temperaturen könnten jedoch auch dazu führen, dass Tiere zu Krankheitsüberträgern werden, die es bislang nicht waren, oder dass es zu einem Wirtswechsel – auch auf den Menschen – kommt. Da Zecken eine bestimmte Temperatur und Luftfeuchtigkeit benötigen, um sich zu vermehren, haben sich ihre Verbreitungsgebiete und ihr Aktivitätszeitraum in Europa in den letzten Jahren ausgeweitet. Gleichzeitig wurde das Freizeitverhalten der Menschen durch den Temperaturanstieg beeinflusst. Man geht daher davon aus, dass auch die Infektionsraten an zeckenübertragenen Krankheiten zunehmen werden (vgl. Kap. 9.3).

In den gemäßigten Gebieten kann die Klimaänderung natürlich auch Gesundheitsvorteile mit sich bringen, wie etwa einen Rückgang bei der Zahl der Kältetoten. Der Gesamteffekt der Klimaerwärmung auf die Gesundheit der Menschen ist jedoch negativ – sowohl in Europa als auch weltweit.

Globale Verteilung der Gesundheitsfolgen

Anthropogene Treibhausgase wurden in den vergangenen Jahrzehnten mehrheitlich von den Industrienationen emittiert. Die Auswirkungen der Klimaveränderung zeigen sich hingegen weltweit. Auch in Europa sind Gesundheitsfolgen nachweisbar. Die Klimaerwärmung verstärkt jedoch v.a. in den sogenannten Entwicklungsländern bereits bestehenden Gesundheitsrisiken weiter. Dieser Effekt ist auch innerhalb einzelner Regionen zu beobachten. In Europa wird z. B. eine Verstärkung des Nord-Süd-Gefälles als Folge des Klimawandels erwartet. Laut WHO betrug die auf die Klimaerwärmung zurückzuführende Krankheitslast (*Burden of Disease*) im Jahr 2000 für Afrika 3.072, für Südostasien 1.704, für den östlichen Mittelmeerraum 1.587, für Südamerika und

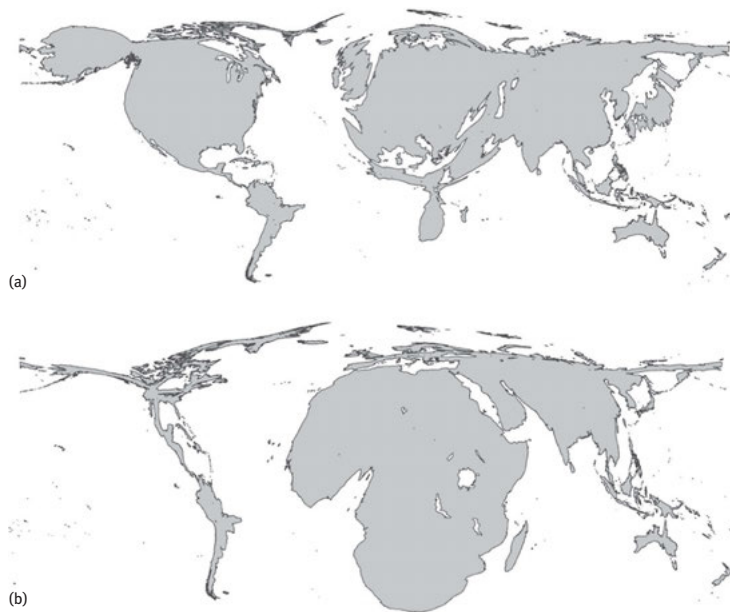


Abb. 6.2: a) Verzernte Darstellung der Erdoberfläche entsprechend dem Wert der dort freigesetzten kumulativen Emissionen von Treibhausgasen, einbezogen wurden Werte bis zum Jahr 2002; b) Verzernte Darstellung der Erdoberfläche entsprechend dem Wert der dortigen Mortalität, der im Jahr 2000 durch den Klimawandel verursacht wurde.

(Quelle: WHO. Protecting Health From Climate Change: Connecting Science, Policy and People. Geneva: World Health Organization, 2009).

die Karibik 189, für den Westpazifik 111 und die so genannten entwickelten Länder 9 DALYs pro 1 Million Einwohner (Abb. 6.2). Im Einzelnen sind klimabedingte Gesundheitsfolgen oft schwer nachzuweisen und zu quantifizieren, da sich zeitgleich viele andere gesundheitsrelevante Faktoren ändern.

6.1.4 Klimapolitik

Das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC; Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen) wurde 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie gegründet. Seine Hauptaufgabe ist es, die Risiken der globalen Erwärmung zu beurteilen und Strategien zu deren Bekämpfung aufzuzeigen. Zusammenfassungen der Forschungsergebnisse erscheinen etwa alle sechs Jahre. Der fünfte Sachstandsbericht wurde Ende 2014 veröffentlicht.

Verschiedene *Emissionsszenarien* sagen für die nächsten zwei Jahrzehnte eine globale Erwärmung von 0,2°C bis 0,6°C pro Jahrzehnt voraus. Aufgrund von Rückkopplungsprozessen ist selbst bei einer Stabilisierung der Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen auf dem Niveau des Jahres 2000 für einige Jahrzehnte eine weitere Erwärmung um 0,1°C pro Jahrzehnt zu erwarten, sodass verschiedene Klimaänderungsprozesse (z. B. der Anstieg des Meeresspiegels) noch Jahrhunderte andauern werden.

Die *Klimarahmenkonvention* (UNFCCC) der Vereinten Nationen wurde 1992 als völkerrechtlich verbindliche Regelung zum Klimaschutz verabschiedet und von den meisten Staaten der Erde unterschrieben. Ihr Ziel ist eine Emissionsminderung bei allen Treibhausgasen. Die Schweiz hat sich mit der Unterzeichnung des darauf basierenden *Kyoto-Protokolls* von 1997 verpflichtet, die Treibhausgasemissionen im Zeitraum von 2008 bis 2012 um 8 % gegenüber dem Stand von 1990 zu reduzieren. Die effektiven Treibhausgasemissionen sanken jedoch insgesamt nur um knapp 1 %. Das Ziel konnte dann unter Anrechnung der CO₂-Aufnahme durch den Wald (Waldsenke) und des Zukaufs von ausländischen Emissionsminderungszertifikaten – d. h. durch Reduktionsleistungen im Ausland – erreicht werden. Deutschland und Österreich haben zugesagt, im Rahmen der ersten Verpflichtungsperiode (2008–2012) ihre Treibhausgasemissionen um 21 % (D) bzw. 13 % (A) gegenüber dem Stand von 1990 zu senken und damit zum Gesamtziel der Europäischen Union (EU, Minderung um 8 %) beizutragen. Während der genannten Periode lagen die Treibhausgasemissionen in Deutschland im Mittel um 23,6 % unter dem Stand von 1990, womit das Reduktionsziel übertroffen wurde. In Österreich wurde dagegen im Mittel rund 5 % mehr Treibhausgase als 1990 emittiert. Hier konnte das Reduktionsziel nur durch den Zukauf von ausländischen Emissionsminderungszertifikaten erreicht werden. Im Rahmen der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (2013–2020) hat sich die EU zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 20 % gegenüber dem Stand von 1990 verpflichtet, die Schweiz zu einer Reduk-

tion um 15,8 %. Allerdings trat die zweite Verpflichtungsperiode bislang nicht in Kraft. Der globale Emissionstrend zeigt noch immer in eine andere Richtung. So stieg der globale Treibhausgasausstoß bis 2010 um rund 29 % gegenüber 1990 an. Verantwortlich dafür sind neben einigen Industrieländern insbesondere die sich rasch entwickelnden Schwellenländer mit einer boomenden Wirtschaft (v.a. China und Indien).

Auf der UN-Klimakonferenz von Paris 2015 wurde beschlossen, die Erhöhung der mittleren globalen Temperatur im Verhältnis zum Niveau vor Beginn der Industrialisierung auf deutlich unter 2 °C (möglichst aber 1,5 °C) zu begrenzen. Dieses so genannte Paris-Abkommen muss aber noch von den Mitgliedsstaaten ratifiziert und in nationale Gesetze überführt werden. Zur Erreichung dieses Zieles ist ein breiter Einsatz von umwelt- und ressourcenschonenden Technologien vonnöten. Hierzu gehören die Verbesserung der Energieeffizienz von Heizungen und elektrischen Geräten, die Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energiequellen, die CO₂-Speicherung beim Betrieb fossiler Kraftwerke und die Aufforstung breiter Landstriche. Aufgrund ihres wirtschaftlichen Aufstiegs tragen mittlerweile auch die so genannten ‚Schwellenländer‘ (*Newly Industrialized Counties*) wie z. B. China, Indien, Brasilien immer mehr zur Klimaerwärmung bei. Ohne Umsetzung der genannten Maßnahmen droht langfristig ein Anstieg der mittleren globalen Temperatur um mehr als 4 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau. Doch selbst eine Erwärmung um 2 °C wird vulnerable Ökosysteme wie die Arktis, kleine Inselstaaten oder Wald- und Trockengebiete stark beeinflussen und den dort lebenden indigenen Völkern ihre Lebensgrundlage nehmen.

6.2 Wasser

Matthias Egger, Claudia Kuehni, Lotte Habermann-Horstmeier

Das Anrecht auf sauberes Wasser gehört zu den grundlegenden Menschenrechten. Sauberes Trinkwasser und ein funktionierendes Abwassersystem sind von zentraler Bedeutung für die menschliche Gesundheit und daher entscheidende Komponenten einer wirksamen Politik zum Schutz der Gesundheit. Wichtige Aspekte sind hierbei die *mikrobiologische Qualität* des Wassers und das Vorhandensein von genügend Wasser für persönliche Hygiene und Lebensmittelhygiene.

6.2.1 Die zentrale Bedeutung von Wasser und Abwasser für die menschliche Gesundheit

Eine sichere, erschwingliche Trinkwasserversorgung sowie ein Kanalisationssystem zur Entsorgung von Fäkalien und Schmutzwasser gehören zu den wichtigsten Voraussetzungen für die Gesundheit in der Bevölkerung. Als erste Stadt Europas waren

die inneren Bezirke von Wien bereits im Jahr 1739 vollständig kanalisiert. Etwa hundert Jahre später trug dann eine Überschwemmung der fäkalienhaltigen Bäche im immer größer werdenden Wiener Stadtgebiet zum Ausbruch der Choleraepidemie von 1831/32 bei. Es folgten weitere Epidemien, denen insgesamt etwa 18.000 Menschen zum Opfer fielen. Die Vorkommnisse wurden zum Anstoß für eines der größten Bauprogramme der Stadtgeschichte, das über 70 Jahre andauerte. Offene Bäche wurden eingewölbt und in zwei Sammelkanäle („Choleraakanäle“) geleitet. Damit hatte Wien 1848 eine der modernsten Kanalisationen der damaligen Zeit. Aufgrund des starken Bevölkerungswachstums im 19. Jahrhundert wurde auch in den anderen europäischen Städten mit dem Bau von Abwasseranlagen begonnen. Vorreiter bei der gesetzlichen Regelung war England: Nach mehreren Choleraepidemien wurde 1848 ein Gesetz erlassen (*Public Health Act*), das zum Ziel hatte, den Bau von Wasserleitungen und Kanalisationssystemen zu fördern. Bemerkenswert hierbei ist, dass zu jener Zeit weder der Erreger noch die Übertragungswege der Cholera bekannt waren. In Berlin war *Rudolf Virchow* (1821–1902) maßgeblich an der Planung der örtlichen Kanalisation und Trinkwasserversorgung beteiligt. In der Schweiz subventionierten die kantonalen Feuerversicherungen den Bau von Wasserleitungen.

Die Kontamination des Trinkwassers durch Krankheitserreger ist weltweit immer noch ein großes Problem. Obwohl sich die Zahl der Menschen mit Zugang zu einer verbesserten Sanitäranlage seit 1990 um fast 2,1 Mrd. erhöht hat, haben noch immer etwa 50 % der Menschen in ländlichen Gebieten keinen Zugang zu sanitären Einrichtungen. Etwa 1,8 Mrd. Menschen nutzen Trinkwasser, das fäkal kontaminiert sein kann. Im Jahr 2012 wurden weltweit ca. 871.000 Todesfälle auf verunreinigtes Trinkwasser und unzureichende Körperhygiene-Praktiken (v.a. mangelhafte Händehygiene) zurückgeführt. Die Hauptursache sind Durchfallerkrankungen, die insbesondere in den ersten fünf Lebensjahren oft zum Tode führen. Etwa die Hälfte der Todesfälle, die mit verunreinigtem Wasser oder Abwasser in Verbindung stehen, wird aus Afrika gemeldet.

Ein zunehmendes Problem ist der Wassermangel. Schon heute sind 40 % aller Menschen weltweit von Wasserknappheit betroffen, Wassermangel verursacht Konflikte oder lässt sie eskalieren, wie z. B. im Nahen Osten zwischen Israel und Palästina, unter den Anrainerstaaten des Nils und des Euphrat oder in Indien (s. Kap. 10.2.5). Es ist absehbar, dass die hiermit zusammenhängenden Probleme aufgrund des Klimawandels in den nächsten Jahrzehnten weiter zunehmen werden (s. a. Kap. 6.1).

Im Jahr 2010 haben die Vereinten Nationen den Zugang zu sauberem Trinkwasser und zu sanitären Einrichtungen als ein Menschenrecht anerkannt. Die Verbesserung der sanitären Situation war ein Millennium-Entwicklungsziel (*Millennium Development Goal*) und ist ein Ziel der nachhaltigen Entwicklung (*Sustainable Development Goal*, s. Kap. 10.3.1).

6.2.2 Krankheitserreger

Wasser kann direkt oder indirekt an der Übertragung von Krankheitskeimen beteiligt sein (s. Tab. 6.2). Dem *fäko-oralen Übertragungsweg* kommt hierbei die größte Bedeutung zu. Direkt durch kontaminiertes Wasser übertragen werden z. B. *Cholera-Bakterien* und das *Norovirus*. Bei Wassermangel können aufgrund mangelnder persönlicher Hygiene oder unsauberem Umgang mit Lebensmitteln z. B. *Shigellen* übertragen werden. Es gibt eine ganze Reihe von Erregern, die sowohl über verschmutztes Wasser als auch über unsaubere Lebensmittel weitergegeben werden (z. B. *Kryptosporidien*). Rotavirusinfektionen, die wegen der raschen Dehydratation besonders bei Kleinkindern und Säuglingen gefürchtet sind, entstehen entweder als Schmierinfektion oder werden durch verschmutzte Lebensmittel bzw. verunreinigtes Wasser (Trinkwasser, Schwimmbadwasser) ausgelöst. Andere Erkrankungen werden durch im Wasser lebende Vektoren³⁹ übertragen (z. B. Wasserschnecken bei der *Schistosomiasis*) oder durch Vektoren, welche Zugang zu Wasser benötigen (z. B. Stechmücken bei der *Malaria*). Das Einatmen von mit *Legionellen* kontaminiertem Wasserdampf führt zur Legionärskrankheit (vgl. auch Kap. 2.1.2 und Kap. 9.3.5).

Tab. 6.2: Infektionen mit engem Bezug zu Wasser.

Übertragung	Beschreibung	Beispiele
Kontaminiertes Wasser	Gastrointestinale Infektion in Folge fäkaler Kontamination des Trinkwassers	Typhus, Cholera, Giardiasis, Infektionen mit <i>Campylobacter</i> , <i>Norovirus</i> , enterotoxischen <i>E.coli</i> , <i>Cryptosporidium</i> etc.
Mangelnde Hygiene	Infektionen, die sich ausbreiten, wenn zu wenig Wasser für persönliche Hygiene und Lebensmittelhygiene zur Verfügung steht	Shigellose, Trachom, Skabies
Vektor lebt im Wasser	Infektionen, die durch Vektoren übertragen werden, welche einen Teil ihres Lebenszyklus' im Wasser verbringen	Schistosomiasis, Drakunkulose
Vektor benötigt Wasser	Infektionen, die durch Vektoren übertragen werden, welche Zugang zu Wasser benötigen	Malaria, Onchozerkose, Trypanosomiasis

Abb. 6.3 illustriert die fäko-oralen Übertragungswege und zeigt mögliche Ansatzpunkte der Prävention. Durch sanitäre Einrichtungen und Abwassersysteme können Fäkalien nicht in Kontakt mit Trinkwasser, Fliegen und Händen gelangen. Regelmä-

³⁹ Vektoren sind Überträger von Krankheitserregern, die Infektionskrankheiten auslösen können (s. Kap. 9.3.4)

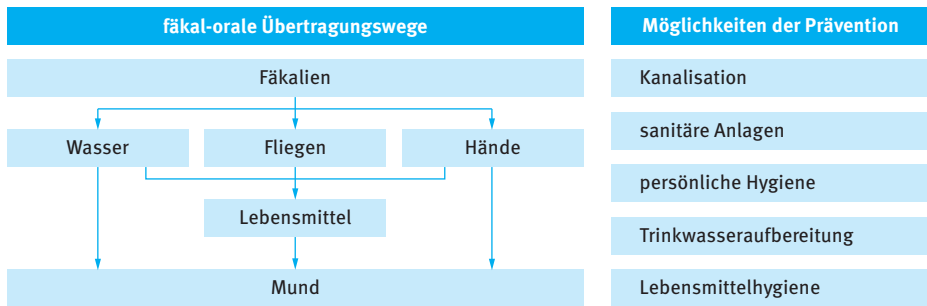


Abb. 6.3: Fäkal-orale Übertragungswege und dort ansetzende Möglichkeiten der Prävention.

ßiges Waschen der Hände – eine von Laien wie Medizinern in ihrer Public-Health-Bedeutung oft unterschätzte Maßnahme! – und hygienischer Umgang mit Lebensmitteln verhindert deren Kontamination (s. Kap. 9.4.3). Schließlich führt die Aufbereitung und Desinfektion von Wasser zu sicherem Trinkwasser.

Menschen können auch über Badegewässer in Kontakt mit Krankheitserregern kommen. So sind beispielsweise die Seen der Norddeutschen Tiefebene von Natur aus sehr nährstoffreich. Mit dem Urin der Badegäste und den Sonnencremes gelangen weitere Nährstoffe ins Wasser. Die im Wasser lebende *Cyanobakterien* („Blualgen“) können sich dadurch stark vermehren. Ihre Toxine können Hautausschläge, Durchfall, Leberschäden, Krämpfe und Lähmungserscheinungen verursachen.

6.2.3 Chemische Verunreinigungen

Für die Qualität des Trinkwassers sind verschiedene Chemikalien von besonderer Bedeutung.

Nitrat und *Nitrit* sind gut wasserlösliche Nährstoffe, die in Landwirtschaft und Garten als Dünger verwendet werden. Eine hohe Nitratbelastung ist derzeit z. B. in weiten Teilen des deutschen Bundeslandes Niedersachsen ein Problem. Ursache hierfür sind zahlreiche, große landwirtschaftliche Betriebe mit Massentierhaltung. Die dadurch anfallende Gülle wird z.T. illegal auf die Felder ausgebracht. Betroffen sind vor allem die Landkreise Cloppenburg und Vechta, wo der von der EU erlaubte Grenzwert im Jahr 2015 an mehr als der Hälfte aller Messstellen überschritten wurde.

Nitrat und Nitrit sind im Wasser ineinander umwandelbar. Wird Nitrat in größerer Menge in den menschlichen Körper aufgenommen, führt dies zur Oxidation des Sauerstoff transportierenden Hämoglobins in den roten Blutkörperchen (es entsteht Methämoglobin) und in extremen Fällen durch die Unterversorgung des Körpers mit Sauerstoff zur Zyanose und zum Tod des Betroffenen. Für Säuglinge besteht ab einem Grenzwert von 50 mg Nitrat pro Liter Trinkwasser akute Gesundheitsgefahr (*Blue Baby*

Syndrome). Dieser von WHO und EU festgelegte Grenzwert berücksichtigt nicht die langfristigen Risiken, die durch die Bildung von krebserregenden Nitrosaminen aus Nitriten im sauren Milieu des Magens entstehen.

Eine Kontamination des Trinkwassers mit *Arsen* hat in der Regel geologische Ursachen, seltener sind gewerbliche Aktivitäten (Mülldeponien, Gerbereien, Braunkohle) hierfür verantwortlich. In Westbengalen (Indien), Bangladesh und Thailand wird aufgrund von arsenhaltigen Erzen in den oberen Bodenschichten der von der WHO empfohlene Grenzwert von 10 µg/l im Grundwasser deutlich überschritten. Fatale Weise wurden dort viele der Brunnen, die arsenhaltiges Grundwasser fördern, zuvor mit internationaler Unterstützung gegraben. Man wollte hierdurch vom Oberflächenwasser, das mit Krankheitserregern kontaminiert war, auf das vermeintlich sichere Grundwasser wechseln. Auch in alpinen Gebieten der Schweiz und Österreichs sind höhere Arsen-Konzentrationen im Trinkwasser möglich. Der Grenzwert liegt in der Schweiz bei 50 µg/l, in Deutschland und Österreich bei 10 µg/l. Das Trinken von arsenhaltigem Wasser über einen längeren Zeitraum ruft charakteristische Hautveränderungen hervor und kann zu Krebserkrankungen (in Harnblase, Niere, Lunge) führen.

Hohe Konzentrationen von *Fluorid* sind toxisch. Sie führen bei ständiger Aufnahme u. a. zu einer Verfärbung der Zähne und später zu Knochenveränderungen bis hin zu einer völligen Versteifung der Knochen und Gelenke. Hohe Fluoridkonzentrationen im Grundwasser finden sich z. B. in Ostafrika, Indien und Mexiko. Sowohl die Schweiz als auch Deutschland und Österreich haben den von der WHO festgelegten Grenzwert (in der Schweiz: Toleranzwert) von 1,5 mg/l übernommen. In einigen Ländern mit niedrigen Fluoridkonzentrationen im Grundwasser (z. B. USA, Australien, Brasilien) ist die *Trinkwasserfluoridierung* durch Zugabe von 1 mg/l zur Kariesprophylaxe gebräuchlich. Wie in den meisten anderen europäischen Ländern wird das Trinkwasser in Deutschland, Österreich und der Schweiz nicht (oder nicht mehr) fluoridiert.

Zu einer erhöhten *Blei*-Konzentration im Trinkwasser (Grenzwert 10 µg/l) kommt es v. a. durch die Verwendung von bleihaltigen Leitungsrohren und Armaturen bei einem niedrigen pH-Wert des Leitungswassers. Blei hemmt die Blutbildung und schädigt das Nervensystem. Besonders gefährdet sind Ungeborene und Kleinkinder. In der Mitte und im Norden Deutschlands sind allerdings nur noch Häuser betroffen, die vor 1973 gebaut wurden. Im gesamten süddeutschen Raum werden schon mehr als 100 Jahre keine Bleirohre mehr verwendet. In der Schweiz dürfen Rohrleitungen aus Blei bereits seit 1914 nicht mehr verbaut werden, in Österreich erst seit 1983. Daher gibt es z. B. in Wien insbesondere aufgrund der hohen Anzahl an Gründerzeit-Häusern, in denen meist Bleirohre verlegt sind, noch immer Grenzwertüberschreitungen beim Bleigehalt im Trinkwasser.

6.2.4 Trinkwasseraufbereitung und -kontrolle im deutschsprachigen Raum

Die Trinkwasserversorgung fällt in Deutschland in den Kompetenzbereich der Gemeinden, Aufsicht führen die Bundesländer. In der Schweiz sind die Kantone für die Trinkwasserversorgung verantwortlich. In Österreich sind es in der Regel Wassergenossenschaften und Wasserverbände, bei denen der Landeshauptmann die unmittelbare Aufsicht ausübt, in dessen Bereich die Genossenschaft bzw. der Verband seinen Sitz hat. Trinkwasser wird aus verschiedenen Rohwässern gewonnen (Grundwasser, Quellwasser, Fluss- und Seewasser). Die meisten deutschen Bundesländer und Schweizer Kantone greifen dabei überwiegend auf Grundwasser zurück. Eine Ausnahme bildet Nordrhein-Westfalen, das sein Trinkwasser größtenteils aus Rhein und Ruhr gewinnt. In Österreich wird Trinkwasser fast zu 100 % aus Grund- und Quellwasser gewonnen. Bei der Erzeugung von Trinkwasser sind die gesetzlichen Vorgaben (in Deutschland und Österreich: Trinkwasserverordnung; in der Schweiz: verschiedene Verordnungen zum Lebensmittelgesetz) maßgebend. Für die Gewinnung aus Grundwasser ist es oft ausreichend, Eisen- und Kalkgehalt des Wassers zu korrigieren. Bei der Aufbereitung von Oberflächenwasser müssen hingegen mehrere Schritte durchlaufen werden. Nach der mechanischen Vorreinigung mit Rechen und Siebanlagen werden über verschiedene Filterstufen ungelöste Substanzen abgetrennt, anschließend wird das Wasser noch desinfiziert.

Trinkwasser ist bei uns das am intensivsten kontrollierte Lebensmittel. Die Qualitätsanforderungen an Trinkwasser sind höher als an industriell abgepacktes Mineralwasser. Die WHO orientiert sich bei der Festlegung von Grenzwerten für mögliche Schadstoffe im Trinkwasser am *Vorsorgeprinzip*. Sie verlangt daher die Überprüfung von 200 Stoffen, deren Auswirkungen auf die Gesundheit bekannt sind. Die entsprechende deutsche Verordnung führt 33 Stoffe mit zugehörigen Grenzwerten an, die bei einer vollständigen Trinkwasseruntersuchung geprüft werden müssen. In der Schweiz werden regelmäßig 22 Substanzen und Keime überprüft. Das verwendete Indikatorprinzip erlaubt es, dadurch auch die Belastung mit verwandten Stoffen abzuschätzen. So steht z. B. das Bakterium *Escherichia coli* für alle Fäkalkeime. Verantwortlich für die regelmäßige Kontrolle der Wasserqualität sind in Deutschland die Gesundheitsämter und in der Schweiz die kantonalen Laboratorien. In Österreich sind hierfür die *Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES)* und die Untersuchungsanstalten der Länder zuständig.

Eine Europäische Bürgerinitiative führt das Menschenrecht auf sauberes Trinkwasser und eine sanitäre Grundversorgung als Argument gegen die Privatisierung der Trinkwasserversorgung und eine kommerzielle Bewirtschaftung der Wasserressourcen innerhalb der EU an. Die Initiative wurde von insgesamt 1.884.790 Menschen unterschrieben (s. Internet-Ressourcen). Als Reaktion darauf nahm der zuständige EU-Kommissar im Jahr 2013 die Wasserversorgung aus der geplanten EU-Konzessionsrichtlinie heraus. 2015 lehnte der Umweltausschuss des Europäischen Parlaments einen Antrag zur Wasserprivatisierung ab. Die Initiatoren der Bürgerinitiative

befürchten jedoch weiterhin, dass z. B. internationale Handelsabkommen einer kommerziellen Bewirtschaftung der Wasserressourcen Vorschub leisten können.

6.3 Boden

Michael Kundi

*„Im Schweiß deines Angesichts sollst du dein Brot essen, bis du zurückkehrst zum Ackerboden; von ihm bist du ja genommen. Denn Erde bist du und zur Erde musst du zurück.“
(1. Buch Mose 3,19)*

Der Boden ist die Grundlage des Lebens auf dem Festland und wesentlich für die Nahrungsmittelproduktion und den Wasserhaushalt. Die Bedeutung des Bodenschutzes für die Gesundheit des Menschen wurde erst relativ spät erkannt und Schutzmaßnahmen erst ab den 1970er Jahren eingeleitet. Schadstoffe, die in den Boden geraten, können direkt oder indirekt über die Nahrungskette in den Körper des Menschen gelangen und dadurch Gesundheitsstörungen verursachen. Beeinträchtigungen des Bodens können darüber hinaus auch weitreichende Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion, die Filterfunktion für das Trinkwasser und die Stabilität im Hinblick auf Erosion und Bodenverfrachtung durch Wasser oder Wind haben.

Als Boden bezeichnet man den obersten Teil der Erdkruste. Er ist ein Produkt der Erosion, der Ablagerung von Stoffen, die durch Wasser und Wind herantransportiert wurden, und der Verrottung von biologischem Material. Jene Bodenschicht, die Landwirtschaft ermöglicht, wird Mutterboden genannt. Sie ist in den gemäßigten Breiten etwa 20–30 cm stark. Der Aufbau des Bodens entscheidet darüber, wie viel Wasser er fassen kann (*Wasserretention*). Wasser versickert so lange im Boden, bis es wasserundurchlässige Sperrschichten (z. B. Felsböden oder verdichtete Lehm Böden) erreicht. Kalkstein kann durch Wasser aufgelöst werden. Auf diese Weise gelangt das Wasser auch in Tiefenschichten und kann in Form von Tiefenströmen große Strecken überwinden. Das Schicksal des Menschen ist untrennbar mit dieser extrem dünnen Oberflächenschicht verbunden, die für den Anbau von Feldfrüchten, für den Obstanbau und die Viehzucht geeignet ist.

6.3.1 Bodenbeschaffenheit

Die obersten Bodenschichten bestehen im Allgemeinen überwiegend (85 bis 90 %) aus Mineralsubstanz, die durch Erosion und Gletscherabrieb aus den Gebirgen durch den Wind und das Wasser über die Erde verteilt wird. Der Rest (10 bis 15 %) ist Biomasse. Diese besteht größtenteils (ca. 85 %) aus totem Material wie Laub, abgestorbenen Pflanzen und den Resten toter Tiere. Etwa 10 % der Biomasse sind Wurzeln lebender Pflanzen. Die restlichen 5 % bilden Bodenorganismen (*Edaphon*). Die Zahl dieser

Organismen ist allerdings ungeheuer groß. In einem Liter Boden leben mehr Organismen als es Menschen auf der Erde gibt. Die zahlen- und massenmäßig größten Anteile entfallen dabei auf die Bodenbakterien (ca. 40 %; insbesondere *Actinomyceten*) und Algen/Pilze (ca. 40 %). Ebenfalls von großer Bedeutung sind die Regenwürmer (12 %). Trotz ihres geringeren Anteils von ca. 5 % spielt die übrige Makrofauna (überwiegend *Gastropoden*, *Polychaeten* und *Arachniden*) eine große Rolle bei der Beseitigung abgestorbener Pflanzen und Tiere. Etwa 3 % der Bodenorganismen gehören zur übrigen Mikrofauna (*Nematoden*, *Milben* etc.).

Das Bodenökosystem ist in einem fein abgestimmten Gleichgewicht. Dort, wo der Mensch nicht eingreift, trägt es zu einer optimalen Durchlüftung und Aufbereitung des Bodens für den Pflanzenwuchs bei. Der Pflanzenwuchs seinerseits liefert den wesentlichen Nachschub für die Biomasse, die das Bodenökosystem am Leben erhält. Zusätzlich führt der Pflanzenwuchs zur Stabilisierung des Bodens und zur Erhöhung der Wasseraufnahmekapazität.

6.3.2 Bedeutung des Bodens

Das Bodensystem hat sehr vielfältige und wichtige Funktionen – als Lieferant der Nahrungs- und Futtermittel, als Siedlungsfläche, Wasserspeicher und Filter für Schadstoffe. Als gigantisches Kohlenstoffreservoir trägt es nicht zuletzt auch zum Erhalt des Weltklimas bei. In seiner Bedeutung als Umweltmedium ist der Boden erst relativ spät erkannt worden. Regulationen zum Schutz des Bodens sind deshalb fast ausschließlich jüngeren Datums. Ihm kommt jedoch unter den Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft) eine zentrale Rolle zu. Der Boden ist das Auffangbecken eines großen Anteils der Schadstoffe, die in die Umwelt gelangt sind (Abb. 6.4).

Stoffe, die in die Atmosphäre emittiert wurden, gelangen durch Sedimentation und Niederschläge in den Boden. Der Boden kann jedoch auch direkt durch Deponierung von Industrie- und Haushaltsmüll oder über verschmutztes Grundwasser kontaminiert werden. Durch den Einsatz von Pestiziden (so genannte „Pflanzenschutzmittel“, z. B. Herbizide und Fungizide) in der Landwirtschaft werden ständig Schadstoffe direkt in den Boden eingebracht. Die heute üblichen Monokulturen sind ohne den Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden nicht mehr denkbar. Dies gefährdet nicht nur das Bodenökosystem und führt letztlich zu Ertragseinbußen. Es stellt darüber hinaus auch eine Gesundheitsgefahr für jene dar, die mit diesen Stoffen umgehen. So werden die Substanzen nicht nur in so genannten Entwicklungsländern oftmals ohne jede Schulung an Landarbeiter und Bauern abgegeben, die diese dann nicht selten in falscher Dosierung und ohne Schutzmaßnahmen anwenden.

Die Substanzen können auf diese Weise auch in die Nahrung gelangen und so die Gesundheit der KonsumentInnen gefährden. Obwohl das Insektenvernichtungsmittel *Dichlordiphenyltrichlorethan* (DDT) seit den 1970er Jahren in den meisten Industrieländern verboten ist, findet es sich auch heute noch im Körper fast aller Menschen.

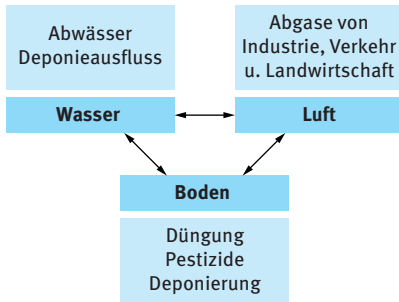


Abb. 6.4: Schadstoffkreislauf – Schadstoff geraten über die Luft und das Wasser in den Boden und werden von dort aus wieder mit der Luft und über das Wasser abtransportiert.

Ähnliches gilt für das Fungizid *Hexachlorbenzol*, dessen Verwendung in der Landwirtschaft in Deutschland seit 1981, in Österreich seit 1992 und in der Schweiz seit 2005 nicht mehr erlaubt ist (siehe Tab. 6.3).

Tab. 6.3: Rückstände von Pestiziden im menschlichen Körper. Konzentrationen von *Dichlordiphenyltrichlorethen* (DDE) und *Hexachlorbenzol* (HCB) im Vollblut von Erwachsenen in Deutschland (2003).

Stoff	Anteil der Proben über der Bestimmungsgrenze	Durchschnitt	Referenzwert
DDE ^a	99,7 %	1,58 µg/l	bis 31 µg/l ^b
HCB	94 %	0,44 µg/l	bis 5,8 µg/l ^c

^a Abbauprodukt von DDT im menschlichen Körper

^b Je nach Alter und Region

^c Je nach Alter

(Quelle: UBA (Umweltbundesamt) Kommission Human-Biomonitoring des Umweltbundesamtes (2003) Aktualisierung der Referenzwerte für PCB-138, -153, -180 im Vollblut sowie Referenzwerte für HCB, β-HCH und DDE im Vollblut. Bundesgesundheitsbl Gesundheitsforsch Gesundheitsschutz 46:161–168).

Da viele der Stoffe in der Natur kaum abgebaut werden, verbleiben sie über Jahrhunderte in einem Schadstoffkreislauf. Der Boden gibt sie an die Pflanzen ab. Diese dienen den Menschen oder Nutztieren als Nahrung. Mit den Pflanzen werden die Schadstoffe aufgenommen, die dann über die Ausscheidungen von Mensch und Tier letztlich wieder in den Boden gelangen.

Grundsätzlich spielen Bodenorganismen bei der *Biodegradation* von Schadstoffen (= Abbau von Umweltchemikalien durch mikrobielle Zersetzungsprozesse) eine große Rolle. Viele Pestizide können jedoch nicht auf diese Weise beseitigt werden, entweder weil sie die Bodenorganismen selbst schädigen oder weil ein Abbau überhaupt nicht möglich ist. Einmal in das Ökosystem eingetragen, verbleiben auch andere Stoffe dort oft unverändert (hohe Persistenz), weil sie nicht oder nur sehr langsam wieder daraus entfernt werden können. Aus diesem Grund wird seit langem gefordert, Chemikalien bei ihrer Zulassung grundsätzlich auch danach zu beurteilen, inwiefern sie durch natürliche Prozesse wieder abgebaut werden können.

6.3.3 Anthropogene Eingriffe

Die Eingriffe des Menschen in das natürliche Bodensystem sind vielgestaltig. Den schwersten Eingriff stellt die Bodenversiegelung durch Straßen, Wege und andere Bauwerke dar. Dabei geht der natürliche Bodenaufbau und damit dessen Funktion völlig verloren. In Deutschland war Mitte der 1980er Jahre über 10 % der Gesamtfläche Siedlungsgebiet. Je nach Vegetationszone und Vorhandensein von Großsäugern führt der natürliche Pflanzenwuchs zu einem reich durchmischten Grasland, aber auch Nieder- oder Hochmoore, Buschland/Savanne oder Mischwald mit Buschwerk und Grasinseln kommen vor. In unseren gemäßigten Breiten wäre ohne den Eingriff des Menschen praktisch die gesamte Fläche mit Wald bedeckt, sofern nicht Wildtiere wie Hirsche, Wildrinder, Wildpferde etc. Teile dieser Fläche durch Abweiden der Baum- und Buschtriebe in Grasland verwandeln würden.

Seit dem Mittelalter wird in Mitteleuropa der Boden durch gezielte Abrodung für die Landwirtschaft nutzbar gemacht. Mit Hilfe der Zwei-, dann der Drei- und Vierfelderwirtschaft konnte die landwirtschaftliche Produktion auf jeweils kleinen Flächen erheblich gesteigert werden. Obwohl sich die Landschaftsform dadurch dramatisch änderte, stellte die daraus resultierende kleinräumige Diversität mit den überall – insbesondere zur Schweinemast – übrig gebliebenen Waldstrichen nur einen verhältnismäßig geringen Eingriff in das Ökosystem dar. Mit dem Siegeszug der *industriellen Landwirtschaft* änderte sich das aber in vielen Regionen grundlegend. Riesige Monokulturen, bewirtschaftet mit Hilfe intensiver Düngung und dem Einsatz von Pestiziden, bedrohen nun die Integrität und Funktionalität des Bodens. In West-Deutschland wurden vor der Wiedervereinigung pro Jahr ca. 30.000 t Pflanzenbehandlungsmittel eingesetzt. Mitte der 1980er Jahre betrug der Schadstoffeintrag dort im Durchschnitt über 100 kg/ha. Dies trägt mit zu einer zunehmenden Verschlechterung der Bodenqualität und zu einem enormen Verlust an Mutterboden bei. Besonders ausgeprägt ist dies beim Maisanbau. Hier beläuft sich der Verlust an Mutterboden jährlich auf über 75 t/ha (= 75 kg/m²). Inzwischen hat man erkannt, dass diesem Raubbau Grenzen gesetzt werden müssen. Es ist aber schwierig, den einmal eingeschlagenen Weg zu

verlassen. Dennoch gibt es in Europa und vereinzelt auch in den USA Ansätze, der Intensivierung des Landbaus entgegen zu wirken.

Die Bedrohung des Bodens resultiert also aus dem Landschaftsverbrauch, dem Schadstoffeintrag und den sonstigen menschlichen Aktivitäten, die den Boden verdichten oder die Erosion fördern. Hinzu kommen weitere Eingriffe, die zur Umverteilung des Wassers und zur Eintiefung von Flüssen führen. In Österreich führten z. B. die Eingriffe in den Flusslauf der Donau durch Kraftwerksbau und Befestigung des Uferbetts dazu, dass nun auch die letzten Reste von Auwald bedroht sind. Vor allem in den subtropischen Gebieten führt der *Klimawandel* zu einer Umverteilung der Regenmengen mit langen Dürreperioden einerseits und sintflutartigen Regenfällen andererseits (s. Kap. 6.1). Derzeit sind bereits riesige Gebiete in Afrika und Asien für die Landwirtschaft verloren, Wüsten breiten sich aus. Der Entzug von Wasser zur künstlichen Bewässerung hat z. B. den Aralsee, einst ein Binnenmeer von gewaltigen Dimensionen, auf einen kleinen Bruchteil seiner Fläche schrumpfen lassen. Auch in anderen Regionen (z. B. Israel, China, USA) hat eine Störung des Gleichgewichts zwischen Wasserzufuhr, Verdunstung und Wasserentnahme dazu geführt, dass die Erhaltung des Bodenaufbaus für die Landwirtschaft nicht mehr möglich ist. Der Bau riesiger Stauanlagen zur Stromgewinnung und Bewässerung ist in manchen Regionen überdies von militärischer Bedeutung, denn die Verfügung über die Ressource Wasser bedeutet auch die Verfügung über das Trinkwasser und über die Produktion von Nahrungsmitteln.

Die innige Verknüpfung zwischen Boden, Pflanzenwuchs und Wasser macht die einseitige Ausnutzung dieser Wechselbeziehungen durch den Menschen für seine kurzfristigen Ziele so problematisch. Zu solchen Ausnutzungen zählt auch die Verwendung des Wassers zum Abbau von Bodenschätzen, wobei oft (z. B. bei der Goldgewinnung im Amazonasgebiet, der Gewinnung seltener Erden in China und Afrika, dem Fracking in den USA) eine erhebliche Kontamination des Grundwassers (s. a. Kap. 6.2.3) und damit auch des Bodens resultiert.

Die Deponierung von Haushalts-, Gewerbe- und Industrieabfällen, die lange Zeit völlig unkontrolliert stattfand, kann ebenfalls den Boden in der Umgebung gefährden. Das ist auch dann der Fall, wenn die Deponie unsachgemäß zugeschüttet wurde. Flüchtige Stoffe können ausgasen und ihren Weg durch den Boden an die Oberfläche finden. Dabei ist auch eine Aufnahme von Schadstoffen durch Pflanzen möglich. Das Eindringen von Wasser in die Deponie kann dazu führen, dass Schadstoffe herausgelöst und abtransportiert werden, sodass es zu einer Gefährdung des Grundwassers kommen kann.

Nicht zuletzt können auch Unfälle bzw. Katastrophen in Kernkraftwerken wie in Tschernobyl oder Fukushima zu einer Belastung des Bodens und des Grundwassers mit Radionukliden führen, die eine Nutzung für den Menschen auf Jahrtausende unmöglich macht (s. Kap. 6.5.2).

6.3.4 Gesundheitliche Folgen für den Menschen

Man unterscheidet direkte und indirekte gesundheitliche Folgen der Bodenkontamination und der Störung des Kreislaufs von Boden, Wasser und Pflanzenbewuchs.

Zu den **direkten Gesundheitsfolgen** gehören v.a. die toxischen Wirkungen von Stoffen, die über den Boden in die Pflanzen gelangen. Sie können über die Produkte von Nutztieren (Milch, Milchprodukte, Fleisch, Fleischprodukte) oder direkt als pflanzliche Kost vom Menschen aufgenommen werden. Die über die Nahrung in den menschlichen Körper gelangten Substanzen können auch eine hormonelle, krebserregende (*kancerogene*), sensibilisierende (*allergene*) und fruchtschädigende (*teratogene*) Wirkung haben (s. Kap. 7.2.1). So wird derzeit z. B. die potentielle hormonelle, kanzerogene und reproduktionstoxische Wirkung der mittlerweile fast überall vorkommenden *Phthalate* (bestimmte Weichmacher von Kunststoffen) heftig diskutiert. In den Boden gelangte Stoffe können adsorbiert an Feinstaub über weite Strecken transportiert und vom Menschen eingeatmet werden.

Es sollte daher in jedem Fall untersucht werden, ob eine Gesundheitsgefährdung daraus resultiert, dass Chemikalien wie z. B. Pestizide oder andere Substanzen (z. B. die als Fugendichtung, Kondensatorflüssigkeiten etc. eingesetzten *polychlorierten Biphenyle*) über den ökologischen Kreislauf in die menschliche Nahrung und von dort aus in den Organismus gelangen können. Der Nachweis einer Schadwirkung ist jedoch oft schwierig, weil mittlerweile nahezu alle Menschen diese Stoffe oder deren Metaboliten in sich tragen. Einer der Gründe für den schwierigen Nachweis ist, dass die Unterschiede zwischen den Menschen in dieser Hinsicht gering sind. Für den Nachweis einer Schadwirkung benötigt man jedoch einen ausreichend großen Gradienten, der umso größer sein muss, je geringer und schwieriger nachweisbar die Wirkung ist. Darüber hinaus haben wir mittlerweile nicht nur einen, sondern Dutzende dieser Stoffe im Organismus. Daher ist die Zuordnung einer gesundheitlichen Beeinträchtigung zu einem herausgegriffenen Stoff nahezu unmöglich. Unter diesen Umständen wäre ein Nachweis nur dann möglich, wenn hierzu sehr große Stichproben (mehreren 10.000 Personen) untersucht würden. Dies ist bisher an den Kosten gescheitert.

Dennoch gibt es Hinweise, dass die Belastung durch solche persistierenden Verbindungen (insbesondere durch chlororganische Stoffe) zur Entstehung von Krankheiten beiträgt. Dabei dürfte der Versuch des Organismus, diese Substanzen zu verstoffwechseln, um sie dann über den Darm (Fäzes) oder den Harn auszuschcheiden, die entscheidende pathogenetische Komponente sein. Bei diesem Versuch können zum einen Stoffe mit toxischem Potenzial entstehen. Zum anderen kann der hauptsächlich in der Leber stattfindende Entgiftungsprozess zu zellschädigenden „Nebenwirkungen“ führen. So perfekt dieser Entgiftungsmechanismus für die in der Natur vorkommenden Stoffe normalerweise wirkt, so problematisch ist er, wenn es um Stoffe geht, die in der Natur nicht vorkommen.

Eine weitere direkte Gesundheitsfolge der Bodenveränderungen sind Hungerkatastrophen, die infolge der Aridisierung⁴⁰, der Erosion des Mutterbodens (z. B. durch Rodung und Einebnung von Windschutzpflanzung) oder der Anpflanzen von Spezies entstehen können, die für die Boden- und Klimaverhältnisse ungeeignet sind (s. Kap. 10.2.2).

Indirekte Gesundheitsfolgen resultieren aus den dadurch ausgelösten Migrationsbewegungen (s. Kap. 10.2.7) und kriegesischen Konflikten sowie aus der Änderung der Anbaubedingungen und Tierhaltung mit den dadurch erzwungenen, geänderten Ernährungsgewohnheiten. So verbraucht ein Mensch, der eine durchschnittliche Menge an Fleisch konsumiert, heute etwa viermal so viel Boden, wie jemand, der sich rein pflanzlich ernährt. Würden alle Menschen auf der Erde die Ernährungsgewohnheiten der Europäer annehmen, bräuchte man mindestens drei Erden. Das größte Problem ist dabei die Bodenfläche, die für das Futter von Nutztieren benötigt wird. Nicht nur aus Gerechtigkeitsgründen, sondern insbesondere auch aus gesundheitlicher Sicht müssen intensive Anstrengungen unternommen werden, um den Fleischkonsum drastisch zu reduzieren. Eine Reduktion der Fleischproduktion auf einen Bruchteil der heutigen Menge würde die Erhaltung eines gesunden Bodenökosystems und des natürlichen Wasserkreislaufs entscheidend erleichtern und hätte positive Auswirkungen auf den Treibhauseffekt. In unseren Breiten können Störung des Bodenaufbaus darüber hinaus z. B. zu Vermurungen⁴¹ führen, die Verletzungen und Todesfälle zur Folge haben können. Bei den Betroffenen bleiben oft schweren psychischen Folgezuständen (posttraumatisches Stresssyndrom) zurück.

6.3.5 Aufgabe von Public Health

Der Boden ist ein wertvolles, nicht vermehrbares Gut. Es ist von existentieller Bedeutung, dass mit dieser Ressource in Zukunft wesentlich sorgsamer umgegangen wird als dies bisher geschah. Die Aufgabe, den Boden vor Belastungen und irreversiblen Eingriffen zu schützen, um die vielfältigen und für den Menschen lebensnotwendigen Funktionen des Bodens zu erhalten, muss entschiedener in Angriff genommen werden. Bislang wird dieses Problem im Bereich Public Health jedoch noch kaum als solches wahrgenommen. Es liegt daher in der Verantwortung von Public-Health-Fachleuten, die gesundheitlichen Folgen der hier aufgezeigten Bodenveränderungen

⁴⁰ *Aridisierung*: Entwicklung von Trockengebieten

⁴¹ *Murgang*: schnell talwärts fließender Strom aus Schlamm und größerem Gesteinsmaterial

vermehrt zu thematisieren und gemeinsam mit Vertretern der Politik und anderen Interessensgruppen Maßnahmen zu ergreifen, die dem entgegen wirken.

6.4 Luft

Nino Künzli, Barbara Hoffmann

Durch Menschen hervorgerufene (anthropogene) Luftverschmutzung gibt es bereits seit der Zeit, als der Mensch erstmals lernte, Feuer gezielt für seine Zwecke einzusetzen. Seither hat er auf vielfältige Weise die Zusammensetzung der ihn umgebenden Luft verändert. Die dadurch entstandene Luftverschmutzung kann bei den betroffenen Menschen zu gesundheitlichen Schäden führen. Luftverschmutzung trägt darüber hinaus aber auch zur Klimaerwärmung bei und beeinträchtigt unsere Umwelt auf vielfältige Weise.

6.4.1 Schadstoffe und ihre Quellen – Emissionen und Immissionen

Luftverschmutzung entsteht durch eine Veränderung der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch zusätzlichen Rauch, Ruß oder Staub bzw. zusätzliche Gase, Aerosole, Dämpfe oder Geruchsstoffe. Die Schadstoffe stammen entweder aus direkten Quellen – man spricht dann von *Emissionen oder Primärschadstoffen* – oder entstehen aus Vorläufersubstanzen (*Sekundärschadstoffe*).

Verbrennungsprozesse in Industrie, Energiewirtschaft, Haushalt und Verkehr sind neben der Landwirtschaft die wichtigsten Quellen für Schadstoffe in der Außenluft. Abb. 6.5 zeigt, welche Anteile die verschiedenen Emissionsquellen an den Gesamtemissionen der wichtigsten Luftschadstoffe haben. In den großen Ballungsgebieten der Erde stellt der zunehmende Straßenverkehr ein erhebliches Problem für die Luftqualität dar. Durch Infiltration und Ventilation gelangen diese Schadstoffe auch in Innenräume. Dort können Verbrennungsprozesse (z. B. Zigarettenrauchen, Kochen und Heizen) sowie die Abgabe von Schadstoffen durch Baumaterialien, Möbel, Haushaltsmittel und Geräte zu einer zusätzlichen Schadstoffbelastung der Innenraumluft führen.

Eine bedeutende Quelle der Innenraumschadstoffbelastung ist der Tabakrauch. Der von Rauchern ausgeatmete Tabakrauch wird zusammen mit dem Rauch, der von brennenden Zigaretten in die Umgebungsluft abgegeben wird, von Nichtrauchern eingeatmet (*Passivrauchen*). Zigarettenrauch enthält etwa 4.000 Substanzen, von denen bisher etwa 20 als krebserregend bekannt sind. Die wichtigsten Schadstoffe im Passivrauch sind Kohlenstoffmonoxid, Nikotin, Stickoxide, Formaldehyd, Benzol und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. Tabakrauch ist darüber hinaus auch eine wichtige Quelle für Feinstaub in Innenräumen. Näheres zum Tabakrauchen finden Sie in Kap. 4.2.2.

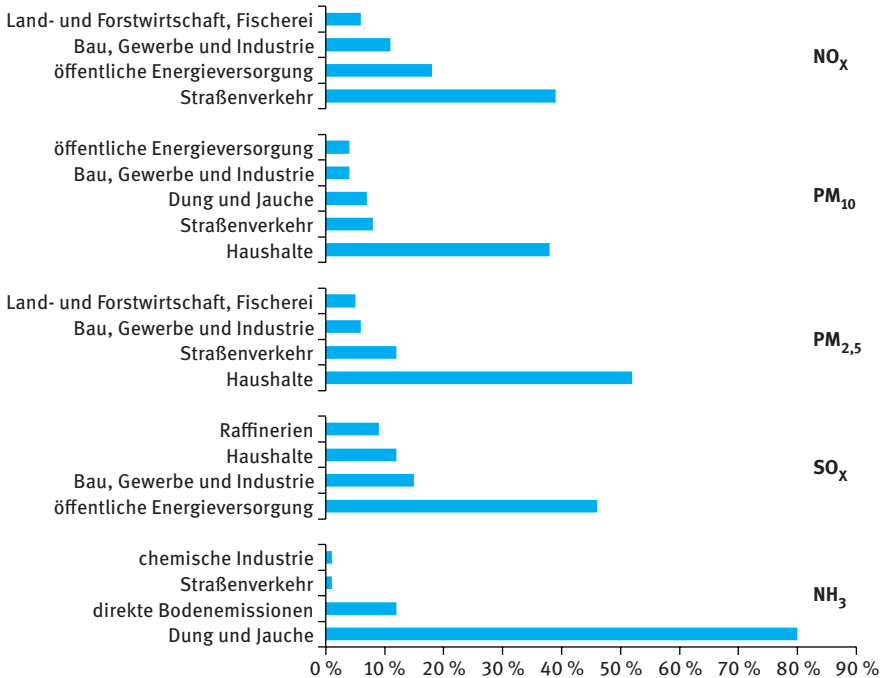


Abb. 6.5: Schadstoffe in der Außenluft in Europa im Jahr 2008. Dargestellt sind die Anteile der verschiedenen Emissionsquellen für Stickoxide (NO_x), Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2,5}), Schwefeloxide (SO_x) und Ammoniak (NH₃) an den Gesamtemissionen. (Datenquelle: European Union emission inventory report 1990–2008 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP), Annex European Union key category analysis, 2010; www.eea.europa.eu).

Aus gesundheitlicher Sicht sind vor allem die *Immissionen* – d. h. die Konzentrationen der Schadstoffe in der Atemluft – bedeutend. Sie unterliegen starken zeitlichen und räumlichen Schwankungen. So können in Mitteleuropa die Tagesmittelwerte der Feinstaubkonzentrationen während winterlicher Inversionswetterlagen durch einen fehlenden Austausch der Luftschichten um ein Vielfaches auf Werte von $> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ansteigen („Smog“). In den stark wachsenden Megastädten Asiens und Afrikas liegen selbst die Jahresmittelwerte oftmals noch höher. Während schwerer Smogepisoden werden in Peking, Delhi und anderen Megastädten Feinstaubkonzentrationen von 500 bis $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen. Solche dramatischen Situationen fordern in einer Stadt dieser Größe täglich mehrere hundert Todesfälle und erinnern an die Zeiten der Europäischen Smogepisoden in den 1930–1950er Jahren.

Aus den in der Luft befindlichen Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen entsteht bei warmen Temperaturen durch UV-Bestrahlung Ozon. Die Ozon-

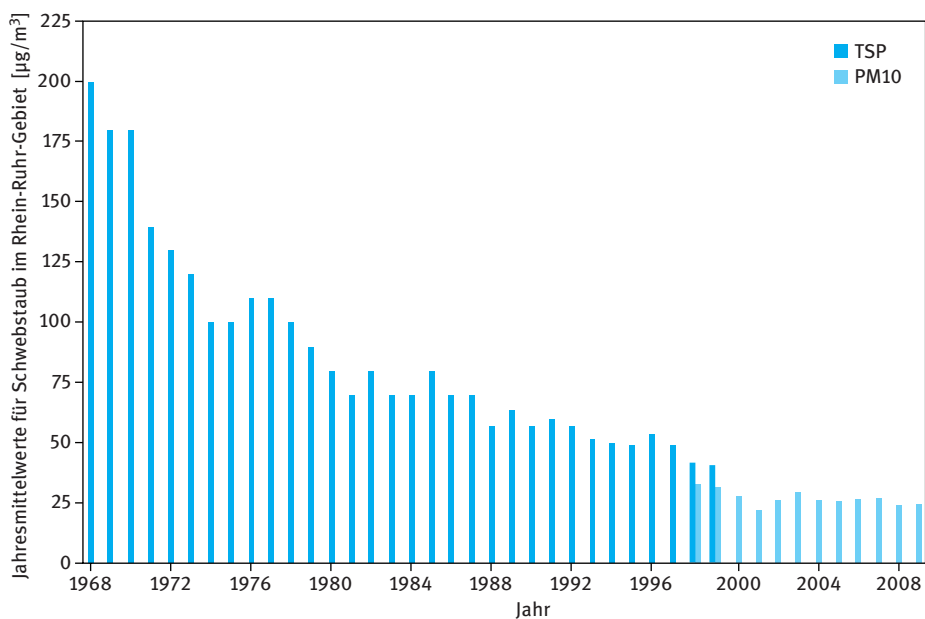


Abb. 6.6: Abnahme der Staubbelastung im Ruhrgebiet von 1968 bis 2009. Zwischen 1968 und 1999 wurde hierzu der gesamte Schwebstaub (*Total Suspended Particles*, TSP) bestimmt. Ab 1998 hat man die Feinstaub-Werte (Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser < 10 Mikrometer [PM_{10}]) registriert. Es handelt sich jeweils um gemittelte Werte von mehreren Messstationen im Rhein-Ruhr-Raum. Das Foto zeigt eine Kupferhütte in Duisburg in den 1970er-Jahren.

(Quellen: Grafik nach: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW), 2011; Fotografie: <http://www.geschichte.nrw.de>; Copyright: dpa).

konzentration unterliegt daher im Tagesverlauf starken Veränderungen („Sommersmog“ mit Anstieg der Werte am Nachmittag/Abend).

Darüber hinaus gibt es erhebliche Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Luftschadstoffe. So liegen die Konzentrationen von Feinstaub und Stickoxiden in urbanen Ballungszentren im Jahresmittel deutlich über denen in ländlichen Gegenden. Die Belastung durch Straßenverkehrsemissionen – wie z. B. durch Kohlenstoffmonoxid (CO) oder ultrafeine Partikel – sind in einem engen Korridor von 50 bis 100 m entlang stark befahrener Straßenschluchten und Autobahnen bis zu zehnmal höher als im übrigen städtischen Bereich.

In den meisten Ländern mit pro-aktiver Luftreinhaltepolitik haben die Schadstoffkonzentrationen in den letzten 20 Jahren abgenommen (Abb. 6.6). Dem steht die oft drastische Verschlechterung der Luftqualität in den wachsenden Metropolen in Asien, Afrika und Südamerika gegenüber. Die dort ergriffenen Regulierungsmaßnahmen halten mit der raschen Zunahme von Industrialisierung und Verkehr nicht Schritt. Allerdings übersteigen die Belastungen auch in Europa und Nordamerika vielerorts noch immer die gesetzlichen Bestimmungen.

In den westlichen Industrienationen unterliegen die Immissionen der wichtigsten Leitschadstoffe in der Außenluft gesetzlichen Regelungen. Zunehmend wird auch die Qualität der Innenraumluft in öffentlichen Räumen überwacht und reguliert. Außerdem gibt es für eine Vielzahl von Schadstoffen am Arbeitsplatz weitergehende Regelungen im Rahmen des Arbeitsschutzes (z. B. Kap. 7.7.3).

6.4.2 Gesundheitliche Auswirkungen

Die gesundheitlichen Auswirkungen der Luftverschmutzung reichen je nach Intensität der Belastung und Sensitivität der Betroffenen von geringfügigen Änderungen bei physiologischen Parametern bis hin zu klinisch relevanten Symptomen. Zahlreiche experimentelle und epidemiologische Studien belegen heute, dass es durch die Anreicherung von Schadstoffen in der Luft zu einer Vielzahl akuter und chronischer Gesundheitsschädigungen kommen kann (Tab. 6.4). Im schlimmsten Fall können Herzinfarkt, chronische Lungenerkrankungen und vorzeitiger Tod die Folge sein.

Tab. 6.4: Nachgewiesene und vermutete gesundheitliche Auswirkungen von städtischer Luftverschmutzung auf den verschiedenen Wirkungsebenen.

Wirkungsebene	Auswirkungen von städtischer Luftverschmutzung
<i>Pathophysiologie</i>	<p>Pulmonale Rezeptoren: Aktivierung pulmonaler Rezeptoren und Beeinflussung des vegetativen Nervensystems mit Überwiegen des Sympathikus</p> <p>Entzündungsreaktionen: Auslösung von oxidativem Stress und lokaler Entzündung in den Atemwegen und dem Lungengewebe, „Spill over“ der Entzündungsmediatoren in den Körperkreislauf und Auslösung einer subklinischen Entzündungsreaktion im gesamten Körper, Einfluss auf Regulierung der Blutgerinnung und der Gefäßweite</p> <p>Übertritt von Schadstoffen in Blutbahn: Auslösung einer subklinischen Entzündungsreaktion im gesamten Körper, Einfluss auf Regulierung der Blutgerinnung und der Gefäßweite</p> <p>Neuronaler Übertritt ins Gehirn: Auslösung von Entzündungsherden im zentralen Nervensystem</p>
<i>Akute Symptome/ Wirkungen</i>	<p>Mortalität: Erhöhung der täglichen Sterblichkeit (v. a. kardio-respiratorische Ursachen)</p> <p>Herz-Kreislauf-System: Anstieg täglicher Herzinfarkt- und Schlaganfallraten, akute Dekompensation einer Herzinsuffizienz, akute Verschlechterung der Lungenfunktion</p> <p>Atemwege: Zunahme von Atemwegsbeschwerden bei Kindern und Erwachsenen, Abnahme der Lungenfunktion, Auslösung von Asthmaanfällen</p> <p>Reproduktion: Mittelfristig verringertes Geburtsgewicht und erhöhte perinatale Sterblichkeit</p>
<i>Langfristige Wirkungen</i>	<p>Mortalität: Verkürzung der Lebenserwartung</p> <p>Herz-Kreislauf-System: Erhöhte Inzidenz kardiovaskulärer und zerebrovaskulärer Ereignisse, Hinweise für Mitverursachung der Arteriosklerose und ihrer Folgeerkrankungen, insbesondere koronare Herzkrankheit (KHK) und periphere arterielle Verschlusskrankheit (pAVK)</p> <p>Atemwege: Verursachung von Asthma bronchiale bei Kindern, Verschlechterung der Lungenfunktion, verringertes Lungenwachstum bei Kindern, Hinweise auf Mitauslösung der chronisch obstruktiven Lungenerkrankung (COPD), Hinweise auf Mitverursachung des Bronchialkarzinoms</p> <p>Stoffwechsel: Hinweise auf Mitwirkung bei der Entwicklung eines Diabetes mellitus</p> <p>Kognitive Funktion: erste Hinweise auf eine Beeinträchtigung</p>
<i>Gesundheitssystem</i>	<p>Akut: Vermehrte Krankenhauseinweisungen, Notfallstationsbesuche, Arztbesuche wegen Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen</p> <p>Langfristig: Erhöhung der chronischen Morbidität der Bevölkerung, v. a. durch Beeinflussung von Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen.</p>

Die in diesem Kapitel beschriebenen gesundheitlichen Auswirkungen werden nicht einzelnen Schadstoffen, sondern dem komplexen Schadstoffgemisch in der Luft zugeordnet. Für die Wirkungen spezifischer Einzelschadstoffe der Innen- und Außenluft sei auf die empfohlene weiterführende Literatur verwiesen.

Akute Auswirkungen

Bereits Stunden oder wenige Tage nach dem Anstieg der Konzentration von Schadstoffen in der Luft kommt es zu akuten gesundheitlichen Auswirkungen beim Menschen. Diese lassen sich sowohl durch experimentelle als auch durch epidemiologische Studien nachweisen. So spiegeln sich zeitliche Schwankungen bei den Belastungen mit Luftschadstoffen direkt in der Häufigkeit von akuten Krankheitsgeschehen wider. Die Rate an Asthmaanfällen und Herzinfarkten kann ansteigen, ebenso die täglichen Sterberaten, die Höhe des Blutdruckes und verschiedene Entzündungswerte im Blut.

Selbst relativ moderate Belastungsschwankungen, wie sie in vielen Regionen der Schweiz, Österreichs und Deutschlands häufig vorkommen, können nachweisbar solche akuten Auswirkungen zur Folge haben. Nimmt beispielsweise der Tagesmittelwert der Feinstaubbelastung um $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu, so steigt die Zahl an Krankenhaus-einweisungen wegen Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen (s. Kap. 8.2 und Kap. 8.7) daraufhin um einige Prozente an, die Sterberaten nehmen um ca. 0,5–1 % zu.

Langzeitwirkungen

Luftverschmutzung begleitet die meisten Menschen ein Leben lang. Der Nachweis gesundheitlicher Langzeitwirkungen ist aufwändig und kann nur anhand großer Kohortenstudien (s. Kap. 2.1.5) erbracht werden. Beispiele für solche Kohortenstudien sind in Österreich das *Vorarlberger Gesundheitsmonitoring und Präventions-Programm*, die Schweizer Erwachsenen-Studie *SAPALDIA*, die deutsche Frauenstudie *SALIA* und die *Kalifornische Kinderstudie*. Sie alle wurden Mitte der 1980er bis Anfang der 1990er Jahr zur Erforschung der Langzeitwirkungen von Außenluftverschmutzung ins Leben gerufen. Die drei europäischen Kohortenstudien haben sich darüber hinaus auch am Europäischen Netzwerkprojekt *ESCAPE (European Study of Cohorts on Air Pollution Effects)* beteiligt. Dort konnten inzwischen mehr als 30 teilnehmende Kohortenstudien den Zusammenhang zwischen Luftverschmutzung und Gesundheit in vielfacher Weise belegen.

Gut belegt sind heute die negativen Auswirkungen der Luftschadstoffbelastungen auf die Entwicklung der kindlichen Lunge. Kinder, die an stark befahrenen Straßen aufwachsen, haben zudem ein erhöhtes Risiko an Asthma bronchiale zu erkranken. Bei Erwachsenen, die in Gebieten mit höherer Luftschadstoffbelastung leben, kommt es im Laufe des Lebens zu einer vorzeitigen Abnahme der Lungenfunktion. In der *SALIA*-Studie konnte ein Zusammenhang mit dem Vorliegen einer chronisch obstruktiven Lungenerkrankung (COPD; s. Kap. 8.7.4) gezeigt werden. Die mittlere Lebenserwartung ist bei einer Langzeitbelastung mit Feinstaub pro $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ um etwa sechs

Monate verkürzt. Studien wie beispielsweise die deutsche *Heinz Nixdorf Recall Studie* weisen darauf hin, dass Feinstaub nicht nur im Tiermodell, sondern auch beim Menschen möglicherweise die Entwicklung einer Arteriosklerose beschleunigt. In einigen Studien wurde darüber hinaus die Zunahme von Lungenkrebs an stark belasteten Orten gezeigt.

Besonders gut untersucht sind hier die akuten und Langzeit-Wirkungen des Passivrauchens auf den menschlichen Körper. Zu seinen Gesundheitsrisiken gehören neben der Reizwirkung auf die Schleimhäute des Atmungstraktes auch eine Verschlechterung der Lungenfunktion sowie ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung von Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Passivrauchende Kinder leiden häufiger an Asthma bronchiale und Mittelohrentzündungen. Auch das Risiko eines plötzlichen Kindstodes ist bei Säuglingen und Kleinkindern in Raucherhaushalten erhöht. Darüber hinaus haben NichtraucherInnen, die in Raucherhaushalten leben, ein um 20 % höheres Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken (s. Kap. 8.3 und Kap. 8.7).

Offene Fragen

Die aktuelle Forschung befasst sich derzeit unter anderem mit der biologischen Wirkung von Feinstäuben bei der Entstehung entzündlicher und chronisch-degenerativer Erkrankungen. Wegen der zum Teil anderen Wirkungsmechanismen sind auch die Auswirkungen der ultrafeinen Nanopartikel aus Verbrennungsprozessen von besonderem Interesse. Darüber hinaus ist noch nicht klar, wie sich der beobachtete Zusammenhang zwischen Luftschadstoffbelastung und niedrigem Geburtsgewicht durch intrauterine Entwicklungsschäden erklären lässt. Weitere Studien beschäftigen sich in diesem Bereich mit der Beeinflussung der frühkindlichen Hirnentwicklung sowie mit nachteiligen Wirkungen auf die neurokognitive Entwicklung im Erwachsenenalter. Weiterhin werden mögliche Interaktion zwischen Schadstoffen und Übergewicht bei der Entstehung eines Diabetes mellitus untersucht. Zur Klärung der hier angeführten Zusammenhänge und Wirkungsmechanismen werden zunehmend auch genetische und epigenetische Methoden mit einbezogen. Schließlich sind die Wechselwirkungen zwischen chronischer Luftverschmutzung und chronischer Lärmbelastung ein wichtiger Forschungsgegenstand, da sich diese beiden häufig gemeinsam auftretenden Umweltbelastungen möglicherweise in ihrer jeweiligen Wirkung verstärken können (s. Kap. 6.6.3).

6.4.3 Luftverschmutzung und Prävention

Wirksame Maßnahmen der Verhältnisprävention zum Schutz vor Luftverschmutzung sind *Luftreinhalteverordnungen* und *Maßnahmenpläne* zur Umsetzung dieser Verordnungen. Verhaltenspräventive Maßnahmen sind vor allem in privaten Innenräumen bedeutsam, da hier durch gesetzliche Vorgaben nur wenig erreicht werden kann.

Maßnahmen der Verhältnisprävention

Präventive Maßnahmen im Bereich der Luftverschmutzung müssen primär im Bereich der Umwelt ansetzen und sind damit ein wichtiger Aspekt der Umweltpolitik. Um eine weitere Verschmutzung der Außenluft mit Schadstoffen zu verhindern, muss eine nachhaltige Reduktion der Emissionen und Immissionen angestrebt werden. Eine Luftreinhaltepolitik, welche bei extremen Smogsituationen lediglich mit Notfallmaßnahmen eingreift, ist ineffizient. Hierdurch können nur die akuten Auswirkungen abgemildert werden. Die chronischen Folgen einer ständigen Belastung durch Luftschadstoffe übersteigen die akuten Folgen von extremen Smogsituationen jedoch um ein Vielfaches. Die gesetzlichen Vorgaben zur Limitierung der Emissionen sind heute in vielen westlichen Ländern für Fahrzeuge und Industrieanlagen außerordentlich streng. Wie der Betrug des Autoherstellers VW zeigt, stehen die Behörden heute vor der großen Herausforderung, die gesetzlichen Vorgaben wirksam zu kontrollieren.

Es gibt keine für die Gesundheit „unschädlichen“ Schadstoffgrenzwerte. Vielmehr gilt das Prinzip, dass umso mehr Personen von den gesundheitlichen Folgen betroffen sind und die Auswirkungen bei den Betroffenen umso stärker sind, je höher die Belastung mit Schadstoffen ist. Daraus leitet sich eine Luftreinhaltepolitik ab, die die tolerierbaren Schadstoffkonzentrationen so niedrig wie möglich ansetzt. Eine solche Politik wird derzeit in Großbritannien verfolgt. Die meisten anderen Länder halten dagegen an gesetzlich festgelegten Grenzwerten fest, welche nicht überschritten werden sollen. Die WHO hat die von ihr empfohlenen Zielwerte aufgrund der vorliegenden wissenschaftlichen Evidenz gesenkt. In der EU liegen die Grenzwerte noch wesentlich höher. Man nimmt damit erhebliche gesundheitliche Schäden in Kauf. Mehrere europäische Länder, die USA und hier insbesondere der Bundesstaat Kalifornien haben hingegen weitaus strengere Grenzwerte festgelegt. In Mitteleuropa ist eine weitere Verbesserung der Luftqualität wegen des überregionalen Transports der Luftschadstoffe nur durch gesamteuropäische Anstrengungen zu erreichen.

Nutzen der Luftreinhaltung

In den letzten Jahren konnte gezeigt werden, dass die heutigen Schadstoffkonzentrationen in der Luft zu negativen gesundheitlichen Auswirkungen führen. Den gesundheitlichen Gewinn einer aktiven „Luftreinhaltepolitik“ direkt nachzuweisen, ist jedoch schwierig, da kontrollierte, randomisierte Interventionsstudien (s. Kap. 2.1.6) nicht durchführbar sind. Zwar können Effekte auf kurzfristige Ereignisse, wie z. B. das Eintreten eines Herzinfarktes, bereits in den ersten Wochen nach dem Absinken der Schadstoffkonzentrationen beobachtet werden. Der Gesamtumfang des gesundheitlichen Gewinns ist allerdings oft erst nach vielen Jahren messbar. So kam es in der Schweiz während der 11 Jahre dauernden *SAPALDIA-Follow-up-Studie* durch die Reduktion der Luftschadstoffe zu einer Verlangsamung der altersbedingten Lungen-

funktionseinschränkung und zu einer geringeren Prävalenz der chronischen Bronchitis. In den ostdeutschen Industriestädten registrierte man nach der Wiedervereinigung deutlich weniger Atemwegserkrankungen bei Kindern, da in dieser Zeit viele Industriebetriebe schließen mussten und es daraufhin zu einem Absinken der Luftschadstoffkonzentrationen kam. Weiterhin konnte in der *Kalifornischen Kinderstudie* festgestellt werden, dass Kinder, die in weniger belastete Gegenden umzogen, ein beschleunigtes Lungenwachstum aufwiesen (s. Kap. 8.7.1).

Maßnahmen der Verhaltensprävention

Im Bereich der Außenluftverschmutzung haben Maßnahmen der individuellen, verhaltensbasierten Prävention nur einen geringen Stellenwert. Zeiten und Orte mit hoher Schadstoffbelastung können bei der Ausübung körperlicher Aktivitäten gemieden werden, um die persönliche Belastung zu reduzieren. Darüber hinaus werden die durch die Luftverschmutzung ausgelösten pathophysiologischen Wirkungspfade durch einen gesunden Lebensstil (z. B. mit Bewegung, Rauchabstinenz und einer Ernährung, die reich an Antioxidantien ist) und eine optimale Behandlung von bereits bestehenden Erkrankungen (u. a. gute Blutdruck- und Blutzuckereinstellung) positiv beeinflusst. Eine Box in Kap. 6.4 auf unserer Lehrbuch-Homepage stellt das Aktionsprogramm „Berlin qualmfrei“ vor, das mit verhaltens- und verhältnisbezogenen Maßnahmen zu einer Verringerung des Tabakkonsums in Berlin beitragen soll.

Innenraumbelastung und Prävention

Im Gegensatz zum Außenraumbereich ist in geschlossenen Räumen eine Reduktion der individuellen Belastung sowohl durch Maßnahmen der Verhaltens- als auch der Verhältnisprävention möglich.

Wichtig ist hier vor allem der Schutz vor Gesundheitsschäden durch **Passivrauchen**. Die Gesetzgebung hat inzwischen in vielen Ländern auf Forschungsergebnisse reagiert, die einen Zusammenhang zwischen Passivrauchen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Erkrankungen der Atemwege und Lungenkrebs (s. Kap. 8.2, Kap. 8.3 und Kap. 8.7) nachweisen konnten. Für den öffentlichen Raum wurden *Nichtraucherschutzgesetze* erlassen, die bereits zu einer Verbesserung der Gesundheit der Bevölkerung geführt haben. Die registrierten Effekte sind jedoch nur teilweise auf die Abnahme der Passivrauchexposition zurückzuführen, da sich als Begleiteffekt oft auch das Verhalten der Rauchenden ändert (v. a. durch Reduktion/Aufgabe des Rauchens; vgl. auch Kap. 4.2.2).

Darüber hinaus konnte in vielen Industriestaaten die Innenraumbelastung mit Luftschadstoffen durch Sanierungsmaßnahmen und spezielle gesetzliche Vorgaben bei der Herstellung sowie Nutzungsempfehlungen für Baumaterialien, Möbel und Haushaltsmittel reduziert werden. So sind in Europa beispielsweise für das kanzerogene Formaldehyd maximal zulässige Konzentrationen festgelegt, die ein Produkt

abgegeben darf. Im privaten Raum gelten jedoch keine gesetzlichen Immissionsgrenzwerte, weshalb für den Innenraum verhaltenspräventive Methoden und die Aufklärung der Bevölkerung eine bedeutende Rolle einnehmen. Wichtig ist hier eine aktive Beratung durch die Ärzteschaft und andere im Gesundheitswesen Tätige – insbesondere dann, wenn Kinder solchen Schadstoffen ausgesetzt sind.

Innerhalb eines Hauses kann es z. B. bei zu starker Wärmedämmung und ungenügender Durchlüftung durch eine erhöhte Feuchtigkeit in den Innenräumen zu einer Belastung der Luft mit Schimmelpilzallergenen kommen. Man geht davon aus, dass sie bei der Entstehung von Allergien und respiratorischen Problemen eine Rolle spielen können.

Anders als in Europa ist die Verbrennung von Biomasse in geschlossenen Räumen zu Koch- und Heizzwecken in Asien, Mittel- und Südamerika, Afrika und dem Südpazifik noch immer ein weit verbreitetes Problem. Die gesundheitlichen Folgen der hierdurch verursachten hohen Innenraumbelastung mit Luftschadstoffen sind erheblich und betreffen vor allem Frauen und Kinder.

6.4.4 Luftverschmutzung, individuelles Risiko und Public-Health-Bedeutung

Im Vergleich zu den Auswirkungen, die aktives Rauchen auf die Gesundheit von RaucherInnen hat, sind die Auswirkungen der Schadstoffbelastung sowohl der Außen-, als auch der Innenraumluft in unseren Breiten für das einzelne Individuum geringer. Im Hinblick auf die Bevölkerungsgesundheit sind sie jedoch durchaus relevant. Dieses vermeintliche Paradoxon rührt daher, dass das *bevölkerungsbezogene attributable Risiko* (PAR, s. Kap. 2.1.3) nicht nur vom individuellen Risiko, sondern auch von der Anzahl der belasteten Personen und der Häufigkeit der Grundkrankheiten abhängt. Anders als beim Rauchen sind nämlich grundsätzlich alle Menschen in einem bestimmten Gebiet der Außenluftverschmutzung ausgesetzt. Entsprechend groß ist der potentielle gesundheitliche Gewinn einer nachhaltigen Luftreinhaltepolitik. Eine Tabelle in Kap. 6.4 auf unserer Lehrbuch-Homepage zeigt Beispiele für den potentiellen gesundheitlichen Nutzen einer reduzierten Schadstoffbelastung mit Feinstaub (PM_{10}) in verschiedenen Regionen Europas. Es wird hierfür angenommen, dass die aktuellen Schadstoffkonzentrationen auf die im Szenario vorgeschlagenen Werte vermindert werden.

6.5 Strahlung

Im elektromagnetischen Spektrum unterscheidet man je nach Wellenlänge bzw. Frequenz zwischen nicht-ionisierender und ionisierender Strahlung. Ionisierende Strahlung ist in der Lage, Elektronen aus einem Atom oder Molekül herauszulösen. Den Begriff der *ionisierenden Strahlung* verbinden wir spontan meist mit den Atom-

bombenabwürfen über Hiroshima und Nagasaki oder den nuklearen Unfällen von Tschernobyl und Fukushima. Für den größten Teil der durchschnittlichen Strahlenbelastung in Mitteleuropa ist jedoch das Edelgas Radon aus Gesteinen und dem Erdreich verantwortlich, das sich in der Atemluft von Wohnhäusern ansammeln kann. Die Folgen des Kontakts mit ionisierender Strahlung reichen von der akuten Strahlenkrankheit bis hin zu Veränderungen im Erbgut. Die Exposition gegenüber technisch erzeugter, *nicht-ionisierender Strahlung* ist im heutigen Alltag unumgänglich. Wo Strom fließt, entstehen niederfrequente elektrische und magnetische Felder. Drahtlose Kommunikationsgeräte wie Mobil- oder Schnurlostelefone emittieren hochfrequente elektromagnetische Felder. *Ultraviolette Strahlung* befindet sich im elektromagnetischen Spektrum im Grenzbereich zwischen ionisierender und nicht-ionisierender Strahlung.

6.5.1 Nicht-ionisierende Strahlung

Martin Rösli, Gabriele Berg-Beckhoff

Definitionen und Maßeinheiten: Das elektromagnetische Feld

Elektromagnetische Felder sind einerseits durch die elektrische und andererseits durch die magnetische Feldstärke charakterisiert. Die *elektrische Feldstärke* E ist abhängig von der Stärke und dem Abstand der elektrischen Ladungen und wird in Volt pro Meter (V/m) gemessen. Die *magnetische Feldstärke* H ist dagegen abhängig von der Stromstärke. Man misst sie in Ampère pro Meter (A/m). Im Niederfrequenzbereich ist die Magnetflussdichte in Tesla (T) ein häufig verwendetes Maß, im Hochfrequenzbereich ist es die Leistungsflussdichte. Letztere misst die Energie, die pro Zeiteinheit durch eine senkrechte Bezugsfläche hindurch tritt (W/m^2). Man unterscheidet dabei zwischen Fernfeld- und Nahfeld-Bedingungen. Das Fernfeld beginnt beim Abstand von mehr als einer Wellenlänge von der Strahlungsquelle. Bei der Mobilfunkstrahlung wäre das also ab einem Bereich von ca. 30 cm (Abb. 6.7).

Expositionsquellen und Belastung der Bevölkerung

Unser europäisches Stromnetz operiert generell mit einer Frequenz von 50 Hz. Drahtlose Kommunikationsgeräte wie Mobil- oder Schnurlostelefone emittieren *hochfrequente elektromagnetische* Felder (HF-EMF) im Mega- und Gigahertzbereich. Dazwischen gibt es weitere Frequenzbänder, die z. B. für Diebstahlsicherungen in Warenhäusern verwendet werden oder Mischformen, wie sie bei der *Magnetresonanztomographie* (MRT) zum Einsatz kommen.

Belastungen durch niederfrequente elektromagnetische Felder (NF-EMF) treten im Alltag vor allem in der Nähe von elektrischen Geräten auf. Kupferspulen, die in Haushaltsgeräten den Strom in Kleinstspannung transformieren, emittieren aufgrund der damit verbundenen Zunahme des Stromflusses magnetische Felder. So kann die

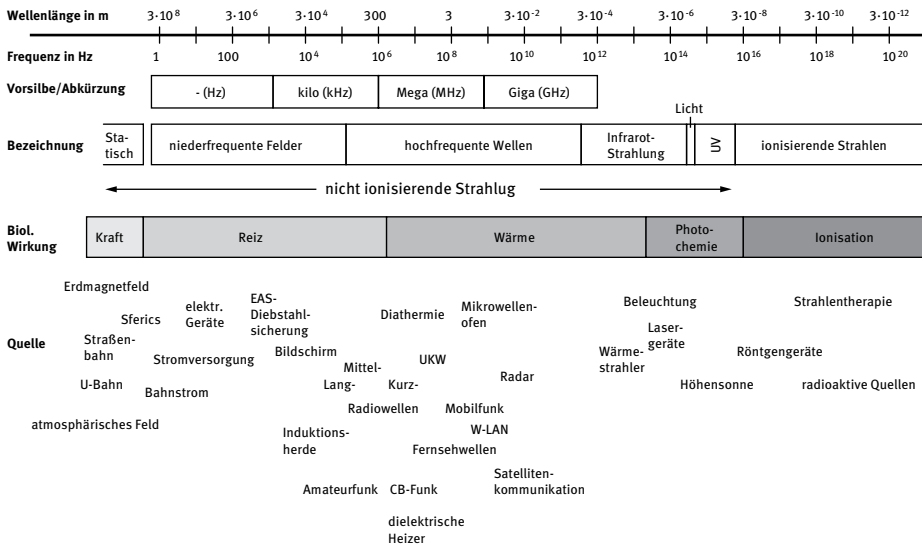


Abb. 6.7: Überblick über das elektromagnetische Spektrum.

(Quelle: Rösli M, Rapp R, Braun-Fahrländer C. Hochfrequente Strahlung und Gesundheit – eine Literaturanalyse. Gesundheitswesen 2003; 65:378–392).

Magnetflussdichte in 3 cm Abstand von einem Föhn, einem Rasierer, Staubsauger oder einer Bohrmaschine 1000 μT betragen. Ausgehend von solchen Punktquellen nimmt die Flussdichte aber umgekehrt proportional zur dritten Potenz des Abstands ab. Eine Verdoppelung des Abstandes führt also zu einer achtmal geringeren Feldbelastung, so dass in einem Abstand von 1 m eine Magnetflussdichte von 1 μT nicht überschritten wird. In der Nähe von Hochspannungsfreileitungen (220 oder 380 kV) treten Magnetflussdichten im Bereich von einigen Mikrottesla auf. Auch hier nimmt die Flussdichte mit der Entfernung erheblich ab. In einer Entfernung von mehr als 100 m sind die Werte dann kleiner als 1 μT . Messungen der durchschnittlichen persönlichen Exposition bei 172 Kindern aus der Schweiz und Italien ergaben einen Wert von 0,05 μT .

Belastungen durch niederfrequente elektromagnetische Felder (NF-EMF) treten im Alltag v. a. beim Telefonieren mit einem Mobiltelefon lokal am Kopf auf. Die maximale *spezifische Strahlenabsorptionsrate* (SAR), die die in einem biologischen Gewebe absorbierte Energie angibt, ist beim Telefonieren mit einem Mobiltelefon rund 1.000 bis 100.000 Mal höher als in der Nähe einer Mobilfunkantenne. Die Abnahme des HF-EMF ist etwa umgekehrt proportional zur Distanz ($1/r$) von der emittierenden Quelle. In der Schweiz wurde im Jahr 2015 die persönliche HF-EMF Exposition einer Bevölkerungsstichprobe im Alltag gemessen. Die mittlere Exposition betrug hier 0,18 V/m. Am höchsten waren die Werte in öffentlichen Verkehrsmitteln. Dosisabschätzungen ergaben, dass im Durchschnitt rund 80 % der vom Körper absorbierten

Strahlendosis vom eigenen Mobiltelefon stammte (Anrufe und mobiler Datentransfer), 10 % von Schnurlostelefonanrufen und 10 % von Fernfeldquellen wie WLAN, Mobilfunkbasisstationen oder den Mobiltelefonen anderer Personen.

Gesundheitliche Effekte

Es ist unbestritten, dass hohe Dosen **niederfrequenter elektromagnetischer Felder** (NF-EMF) gesundheitsschädigend sind. Magnetfelder durchdringen den Körper praktisch ungehindert, während elektrische Felder kaum in den Körper eindringen können. Zeitlich variierende Magnetfelder induzieren dabei einen Strom im Körper. Dagegen verursacht ein elektrisches Wechselfeld Ladungsverschiebungen auf der Körperoberfläche, die zu Verschiebeströme im Körper führen. Stromflüsse im Körper erfolgen entlang von gut leitenden Strukturen, typischerweise entlang von Nervenbahnen, und können dort, wenn sie groß genug sind, ein Aktionspotential auslösen.

Derzeit noch kontrovers diskutiert werden mögliche gesundheitliche Wirkungen im Niedrigdosisbereich. Verschiedene epidemiologische Studien fanden übereinstimmend ein erhöhtes Leukämierisiko bei Kindern, die an ihrem Wohnort niederfrequenten Magnetfeldern (NF-MF) von mehr als 0,3–0,4 μT ausgesetzt waren. In Zell- und Tierstudien wurde jedoch bisher kein biologischer Mechanismus entdeckt, der die epidemiologischen Befunde erklären könnte. Die *International Agency for Research on Cancer* (IARC) hat deshalb NF-MF als möglicherweise kanzerogen klassifiziert. Sollte tatsächlich ein ursächlicher Zusammenhang bestehen, wären rund ein bis vier Prozent aller Erkrankungen an Leukämie bei Kindern unter 15 Jahren auf NF-MF zurückzuführen. In der Schweiz wäre dies etwa ein Fall pro Jahr.

Seit langem bekannt ist die *thermische Wirkung* von **hochfrequenten elektromagnetischen Feldern** (HF-EMF), die bei Mikrowellenöfen auch technisch genutzt wird. Von den so genannten *nicht-thermischen Auswirkungen im Nahfeldbereich* ist das mögliche Hirntumorrisiko durch Handynutzung am intensivsten untersucht. Im Alltag ist kein anderer Körperteil durch HF-EMF so stark exponiert wie der Kopf bei der Benutzung eines Mobiltelefons. Deshalb geht man davon aus, dass sich eine mögliche Kanzerogenität von HF-EMF am ehesten in Form von Tumoren im Kopfbereich manifestieren würde. Bisher gibt es keine robusten Hinweise darauf, dass sich das Hirntumorrisiko durch Handygebrauch innerhalb von fünfzehn Jahren erhöht. Aussagen zu einer längeren Nutzungsdauer sind aufgrund fehlender empirischer Daten beim Menschen noch nicht möglich. Auch fehlt ein Erklärungsansatz, auf welche Weise nicht-thermische HF-EMF kanzerogen wirken könnten. Dennoch wurden auch HF-EMF von der *Internationalen Agentur für Krebsforschung* (IARC) als möglicherweise kanzerogen klassifiziert. Der einzige, bisher konsistent nachgewiesene Effekt von Handys ist ein Einfluss auf die Hirnströme. Ob dies gesundheitsrelevant ist, ist jedoch noch unklar.

Im *Fernbereich* sind gesundheitliche *nicht-thermische Auswirkungen* hochfrequenter Felder (wie z. B. von Mobilfunksendeanlagen) wegen der geringen Exposition

nur schwer zu erfassen. Bis heute konnte keine Evidenz für einen Zusammenhang zwischen HF-EMF und Befindlichkeits- bzw. Schlafstörungen oder gar Krebserkrankungen nachgewiesen werden.

Es ist damit unklar, ob HF-EMF Krankheiten auslösen können. Da bisher keine belastbaren Hinweise auf Risiken gefunden wurden, sind die möglichen Risiken für das Individuum vermutlich klein. Mittlerweile gibt es aber weltweit mehr Handy-Abonnements als es Menschen gibt. Dies bedeute aus Public-Health-Sicht, dass auch ein mögliches kleines Gesundheitsrisiko auf globaler Ebene bedeutsame Konsequenzen haben könnte (s. dazu auch die Box „Bürgerinitiativen fordern: Der Mast muss weg.“ in Kap. 6.5.1 auf unserer Lehrbuch-Homepage).

Gesetzgebung

Als Grundlage für die Festlegung von Grenzwerten im Bereich der nicht-ionisierenden Strahlung dienen in den meisten Ländern die Publikationen der *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP). Im niederfrequenten Bereich beruhen die Grenzwerte auf den replizierbaren Auswirkungen der internen Körperströme. Bei hochfrequenten Feldern ist die *spezifische Strahlenabsorptionsrate* (SAR) die relevante Messgröße. Studien konnten zeigen, dass eine Ganzkörperabsorption von 4 W/kg bei einer 30-minütigen Exposition zu einer Erwärmung des Körpers um 1 °C führt. Es wird angenommen, dass dies bei einem gesunden Menschen die Grenze ist, die physiologisch kompensiert werden kann. Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 10 wurde für die berufliche Exposition ein Basisgrenzwert von 0,4 W/kg festgelegt. Für die Allgemeinbevölkerung hat man den Basisgrenzwert nochmals fünfmal tiefer angesetzt (0,08 W/kg). Daraus leitet sich für die Mobilfunkstrahlung (je nach Frequenz) ein **Immissionsgrenzwert** von 41–61 V/m ab. Dieser Immissionsgrenzwert wurde auch von Deutschland und der Schweiz übernommen (Deutschland: Novelle der 26. *Bundes-Immissionsschutzverordnung* [BImSchV] vom 22.08.2013); Schweiz: *Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung* [NISV] von 1999) und in Österreich in die *allgemeine nationale Norm* (ÖNORM E 8850) eingearbeitet. Im Sinne des präventiven Gesundheitsschutzes führte die Schweiz neben einem Immissionsgrenzwert noch einen **Anlagegrenzwert** ein. Dieser ist für hochfrequente elektromagnetische Felder zehnmal niedriger und darf an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN, z. B. Wohnungen und Schulen) durch eine einzelne Anlage nicht überschritten werden. Im niederfrequenten Bereich gibt es für unterschiedliche Wellenlängen unterschiedliche Grenzwerte. So liegt der ICNIRP-Referenzwert für 50 Hz Felder bei 200 µT, der schweizerische Immissionsgrenzwert für 50 Hz Felder dagegen bei 100 µT und der Anlagegrenzwert bei 1 µT.

Ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung)

Das Spektrum der ultravioletten Strahlung erstreckt sich über den Wellenlängenbereich von 10 bis 400 nm und befindet sich im elektromagnetischen Spektrum zwi-

schen sichtbarem Licht und ionisierender Strahlung (Abb. 6.4). Die wichtigste Quelle natürlicher UV-Strahlung ist die Sonne. Aus kosmetischen Gründen setzen sich viele Menschen in Solarien künstlicher UV-Strahlen aus. Je kürzer die Wellenlänge ist, desto energiereicher ist die Strahlung. Aufgrund der daraus resultierenden, unterschiedlichen biologischen Wirkungen unterscheidet man die Teilbereiche UV-A (320–400 nm), UV-B (280–320 nm), UV-C (100–280 nm) und Vakuum-UV (10–100 nm). UV-B-Strahlung regt die Bildung von Vitamin D in der Haut an. Ultraviolette Strahlung kann jedoch auch zu einer Reihe von unerwünschten Effekten führen, wie z. B. zu beschleunigter Hautalterung, Augenschädigungen und einer Schwächung des Immunsystems. Die Exposition gegenüber UV-Strahlung gilt auch als wichtigster exogener Risikofaktor bei der Entwicklung von bösartigen Hauttumoren wie dem schwarzen Hautkrebs (malignes Melanom), Basalzellenkarzinomen (Basaliom) und Plattenepithelkarzinomen (Spinaliom). In den Solarien werden hauptsächlich UV-A-Strahlen eingesetzt, die die Haut zwar schnell bräunen, aber auch altern lassen. Anders als UV-B-Strahlen führen UV-A-Strahlen nicht zu einer Verdickung der Haut, die Haut ist damit nicht auf die Bestrahlung vorbereitet.

Die *International Agency for Research on Cancer* (IARC) klassifizierte UV- und Sonnenstrahlung sowie die Benutzung von Solarien 2009 als „krebserzeugend“ (kanzerogen; Gruppe 1). Nach einer gemeinsamen Meta-Analyse des *International Prevention Research Institutes* und des *European Institutes of Oncology* ist das Risiko, an einem malignen Melanom zu erkranken, für Personen, die vor dem 35. Lebensjahr ein Solarium besuchen, um 59 % erhöht. Man nimmt an, dass häufige, kurze und intensive Bestrahlungen sowie die damit verbundenen Sonnenbrände vor allem im Kleinkindalter eine besonders schädliche Wirkung haben. Im Hinblick auf das Erkrankungsrisiko spielt auch der Hauttyp eine große Rolle. Hellhäutige und insbesondere rothaarige Menschen haben ein deutlich höheres Risiko, an Hautkrebs zu erkranken als dunkelhäutige Personen. Aufenthalte im Freien sollten daher bei hoher Sonneneinstrahlung immer mit einem vorbeugenden, guten UV-Schutz kombiniert werden. Präventive Maßnahmen sind der Aufenthalt im Schatten, das Tragen von Sonnenbrille und Kopfbedeckung sowie die Verwendung einer empfohlenen Sonnencreme.

6.5.2 Ionisierende Strahlung

Claudia Kuehni, Maria Blettner

Definitionen und Maßeinheiten

Ionisierende Strahlung ist definiert als elektromagnetische Strahlung oder Teilchenstrahlung mit genügend Energie, um aus Atomen oder Molekülen Elektronen herauszuschlagen (*Ionisation*). Ionisierende Strahlung entsteht beim radioaktiven Zerfall instabiler Atomkerne, wobei zwischen Alpha-, Beta- und Gammastrahlung unterschieden wird:

- *Alpha-Teilchen* bestehen aus je zwei Protonen und Neutronen (He-Kern). Diese vergleichsweise schweren Teilchen können einige Zentimeter Luft durchdringen, nicht aber die menschliche Haut. Sie werden gefährlich, wenn sie mit der Atmung oder der Nahrung ins Körperinnere gelangen. Beispiele für Alphastrahler sind Uran, Thorium und Plutonium sowie die Zerfallsprodukte Radium und Radon.
- *Beta-Teilchen* sind Elektronen bzw. Positronen, die mit großer Geschwindigkeit aus zerfallenden Atomkernen austreten und einige Meter Luft oder Millimeter Gewebe durchdringen können. Betastrahlung führt in hohen Dosen (mehrere Gray, s. Box 6.5.1) zu Verbrennungen und Hautkrebs. Bei Aufnahme in den Körper kann der Betastrahler *Iod-131* Schilddrüsenkrebs auslösen, während *Strontium-90* zu bösartigen Knochentumoren und Leukämien führen kann.
- *Gammastrahlen und auch technisch erzeugte Röntgenstrahlen* sind kurzwellige elektromagnetische Strahlen. Sie sind extrem energiereich, bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit und durchdringen mehrere Zentimeter Blei. Diese Strahlen können in allen Bereichen des menschlichen Körpers Schäden verursachen (s. Box 6.5.1).

Box 6.5.1: Ionisierende Strahlung: Maßeinheiten

- Als *Energiedosis* (in Gray; $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$) bezeichnet man die pro Kilogramm bestrahlter Materie bzw. bestrahlten Gewebes absorbierte Energie. Sie hängt von der Intensität der Bestrahlung und der Absorptionsfähigkeit der bestrahlten Materie ab.
- Die *Äquivalentdosis* (in Sievert, Sv) ist ein Maß für die Stärke der biologischen Wirkung einer bestimmten Strahlendosis. Sie errechnet sich aus der absorbierten Energiedosis (in Gy) multipliziert mit einem Faktor, welcher die biologische Wirksamkeit der Strahlung (Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung) berücksichtigt.
- Unter der *effektiven Dosis* oder *gewichteten Ganzkörperdosis* (in Sv) versteht man die Summe der mit einem Gewebewichtungsfaktor multiplizierten Äquivalentdosen aller Organe. Die organspezifischen Gewebewichtungsfaktoren berücksichtigen die unterschiedliche Strahlensensibilität der verschiedenen Organe und Gewebe.

Strahlenexposition der Bevölkerung

Die durchschnittliche Strahlenexposition beträgt in der Schweiz rund 5,5 mSv/Jahr, in Österreich und in Deutschland etwa 4 mSv/Jahr (Abb. 6.8). In der Schweiz macht Radon mit 3,2 mSv/Jahr den Hauptteil aus, in Deutschland sind es im Durchschnitt 1,1 mSv/Jahr. Regional kann die Radonbelastung aber stark variieren.

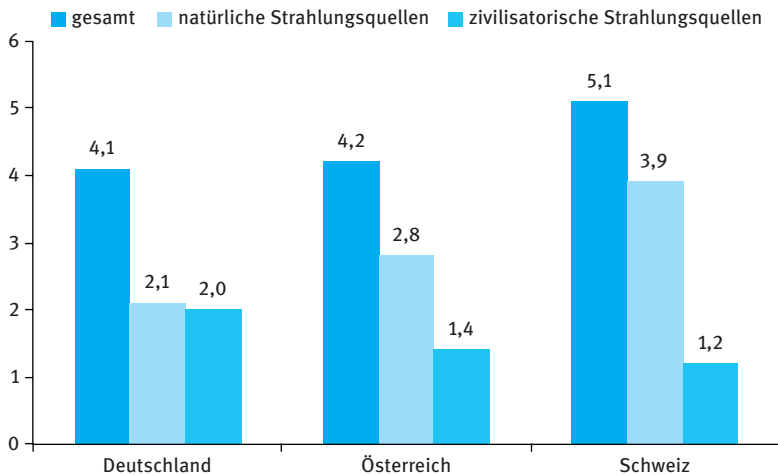


Abb. 6.8: Durchschnittliche Strahlenexposition der Bevölkerung in Deutschland (2015) Österreich (2015) und der Schweiz (2015) insgesamt sowie unterschieden nach natürlichen und zivilisatorischen Strahlungsquellen als Ursachen dieser Strahlenexposition. Angabe der Zahlen in Millisievert (mSv) pro Person und Jahr.

(Quellen der dieser Abbildung zugrunde liegende Daten: Deutschland: http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/natuerliche-strahlenbelastung/natuerliche-strahlenbelastung_node.html; Österreich: <http://www.ages.at/themen/strahlenschutz/strahlenbelastung-in-oesterreich/>; Schweiz: <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/11191/11193/11196/index.html?lang=de>)

Das radioaktive Edelgas *Radon*, ein Zerfallsprodukt aus der ²³⁸Uran-Zerfallsreihe, kommt in vielen Gesteinsarten vor. Bei durchlässigem Untergrund (Spalten, Schutt, Karst) gelangt es aus dem Boden in die Atmosphäre, in Grundwasser, Keller und Rohrleitungen. Abhängig von der Bauweise der Häuser (mangelhafte Abdichtung gegenüber dem Untergrund) kann es sich dann in schlecht belüfteten Unter- und Erdgeschossen ansammeln. In der Schweiz kommen hohe Radonkonzentrationen v. a. in den Alpen und im Jura vor, in Deutschland überwiegend in den südlichen Mittelgebirgen. Die Alphateilchen können die menschliche Haut nicht durchdringen. Sie werden jedoch mit an Staub gebundenen radioaktiven Zerfallsprodukten eingeatmet.

Die effektive Dosis durch *kosmische Strahlung* beträgt in unseren Breitengraden auf Meereshöhe etwa 0,4 mSv/Jahr. Auf 3.000 m hohen Bergen sind es 1,2 mSv/Jahr, in 10.000 m Höhe liegt die Strahlendosis bei 20–50 mSv/Jahr. Flugreisen tragen daher

mit etwa 5 μSv pro Flugstunde zur Strahlenexposition bei. Ein Flug von Europa in die USA und zurück setzt uns einer Strahlendosis von etwa 0,06 mSv aus. *Terrestrische Gamma-Strahlung* (0,35 mSv/Jahr, abhängig vom Bodengrund) entsteht durch natürlich vorkommende Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen sowie von ^{40}K . Durch die *Nahrung* werden ebenfalls *Radionuklide* in den Körper aufgenommen (0,35 mSv/Jahr). Mit 0,2 mSv dominiert ^{40}K im Muskelgewebe, hinzu kommen Zerfallsprodukte von Uran und Thorium sowie die durch kosmische Strahlung in der Atmosphäre erzeugten Radionuklide (z. B. Tritium ^3H , ^{14}C und ^7Be). Künstliche Radionuklide tragen weniger als 1 μSv /Jahr zur Strahlenexposition durch Nahrungsmittelaufnahme bei. Es handelt sich um Lebensmittel, die ^{137}Cs und ^{90}Sr aus Kernwafferversuchen der 1960er Jahre und vom Reaktorunfall in Tschernobyl 1986 enthalten. Für die westeuropäische Bevölkerung ist die zusätzliche Belastung bei Lebensmitteln durch die Schäden an den Reaktoren in Fukushima im März 2011 sehr gering. Anders dagegen in Japan: Die um Fukushima angebauten Lebensmittel waren, ebenso wie der Fisch und die Meeresfrüchte aus diesem Gebiet, zum Teil erheblich strahlenkontaminiert und durften nach dem Ereignis nicht in den Handel gelangen. Für bestimmte Produkte aus einigen Präfekturen in Japan – insbesondere aus Fukushima – galten bis Anfang 2016 sehr strenge Vorschriften für die Einfuhr in die EU, die aber im Januar 2016 gelockert wurden. Die mittlere Exposition pro Einwohner als Folge der *diagnostischen und interventionellen Radiologie* wurde für Deutschland (2016) auf 1,9 mSv/Jahr, für die Schweiz (2013) auf 1,4 mSv/Jahr und für die USA (2005–2007) auf 2,4 mSv/Jahr geschätzt. Der Trend ist weiter ansteigend, da die Computertomographie (CT) zunehmend als diagnostische Standardmethode eingesetzt wird. Sie ist in der Schweiz schätzungsweise für über zwei Drittel und in Deutschland für 50 % der medizinischen Strahlendosis/Einwohner verantwortlich (s. Tab. 6.5).

Tab. 6.5: Effektive Strahlendosen, denen PatientInnen im Rahmen der medizinischen Diagnostik ausgesetzt sind.

Untersuchung	Äquivalentdosis (in mSv)
Thorax-, Zahn- oder Schädelröntgen	0,02 – 0,2
Abdomen- oder Wirbelsäulenröntgen	0,3 – 5,0
Mammographie (4 Bilder)	1,0
Kontrastaufnahmen (Bariumpassagen, Angiographien)	1 – 10
Computertomographie	1,5 – 10

Weitere Quellen für geringe zusätzliche Strahlenbelastungen ($\leq 0,1 \text{ mSv/Jahr}$) sind Industrie, Forschung, Konsumgüter und Kernkraftwerke. Die *radioaktiven Emissionen aus der Abluft und dem Abwasser von Kernkraftwerken* im Normalbetrieb betragen für unmittelbare Anwohner maximal ein Hundertstel mSv/Jahr.

Wirkungen und Mechanismen

Ionisierende Strahlung verursacht DNA-Veränderungen im Zellkern. Können diese nicht repariert werden, führt das zum Zelltod oder zu Zellveränderungen:

- *Zelltod*: Ab einer Schwellendosis von 200–300 mSv verlieren Zellen ihre Teilungsfähigkeit und sterben nach Ablauf ihrer Lebensdauer ab.
- *Zellveränderungen*: Überleben die Zellen trotz DNA-Veränderungen und werden nicht repariert, dann vererben sie diese Veränderungen an ihre Tochterzellen. Daraus resultierende Schäden können Jahre oder Jahrzehnte später auftreten. Die *Wahrscheinlichkeit* des Eintretens (aber nicht die Schwere) eines Schadens ist proportional zur Strahlendosis. Die Folgen solcher DNA-Veränderungen können sowohl somatischer (→ *Kanzerogenese*) als auch genetischer Natur (→ *Mutationen*) sein. Es gibt hierbei keine Schwellendosis. Die beschriebenen Schäden können auch bei sehr niedrigen Dosen entstehen.

Die Schwere des Gesundheitsschadens hängt ab von:

Strahlendosis und Strahlenart

- *Dosisrate*: Es gibt Anhaltspunkte dafür, dass der Schaden größer ist, wenn die Dosis innerhalb kurzer Zeit (Sekunden) verabreicht wird, statt über Jahre hinweg. Bei einer fraktionierten Verabreichung haben die Zellen Zeit, um Reparaturprozesse in Gang zu bringen (→ *fraktionierte Strahlentherapie*).
- *Art der betroffenen Organe*: Je weniger differenziert die betroffenen Zellen sind, desto strahlenempfindlicher ist ein Gewebe. Besonders strahlenempfindlich sind Organe mit einer kurzen Lebensdauer ihrer Zellen und einer hohen Zellteilungsrate. Hierzu gehören die Blutbildungsorgane sowie die Schleimhäute z. B. im Magen-Darm-Trakt. Auch Keimdrüsen und embryonales Gewebe sind äußerst strahlensensibel.
- *Alter bei Bestrahlung*: Die Strahlenempfindlichkeit eines Menschen sinkt mit steigendem Alter. Ungeborene Kinder (v. a. im 1. Schwangerschaftsdrittel), aber auch Kinder und Jugendliche sind aufgrund des noch nicht abgeschlossenen Wachstums empfindlicher als ältere Menschen.
- *Individuelle Strahlenempfindlichkeit*: Es gibt Anhaltspunkte dafür, dass Menschen abhängig von ihrer genetischen Prädisposition und dem allgemeinen Gesundheitszustand unterschiedlich strahlenempfindlich sind.
- *Latenzzeit*: Zwischen der Exposition und dem Auftreten einer Krebserkrankung oder anderen Strahlenfolgen besteht in der Regel eine Latenzzeit, die sich je nach Art der Erkrankung und dem Alter bei Bestrahlung unterscheidet. Für Leukämien und Schilddrüsenkarzinome sind es bei einer Bestrahlung im Kindesalter 2–3 Jahre, im Erwachsenenalter dagegen etwa 8 Jahre. Bei anderen strahleninduzierten Krebsarten liegen die Latenzzeiten bei über 10 Jahren.

Gesundheitsfolgen

Hinweise über mögliche Gesundheitsrisiken liefern uns *epidemiologische Datenquellen aus folgenden Bereichen*:

- Überlebende der Atombombenexplosionen von *Hiroshima* und *Nagasaki*: Etwa 3 % der Betroffenen wurden mit hohen Dosen (> 1 Sv) bestrahlt. Die Kohorte ist jedoch auch repräsentativ für niedrige Expositionen, da viele der über 100.000 Betroffenen niedrigeren Dosen (5–200 mSv) ausgesetzt waren.
- PatientInnen, die aus diagnostischen oder therapeutischen Gründen bestrahlt wurden (z. B. SkoliosepatientInnen, KrebspatientInnen)
- Beruflich strahlenexponierte Personen (z. B. in Krankenhäusern, Arztpraxen, Kernkraftwerken, Forschungsanlagen, fliegendes Personal, ArbeiterInnen im Uranbergbau)
- Bewohner in der Umgebung kerntechnischer Anlagen mit hohen radioaktiven Freisetzungen, wie z. B. *Hanford* (USA), *Mayak* (Russland) und *Tschernobyl* (Ukraine; s. a. Box 6.5.2), sowie die von oberirdischen Atombombentests Betroffenen (z. B. *Bikini-Atoll*, *algerische Sahara*).

Box 6.5.2: Die Folgen von Fukushima.

Am 11. März 2011 ereignete sich vor der japanischen Ostküste eines der stärksten bislang registrierten Erdbeben. Das Beben und der darauf folgende Tsunami führten in dem japanischen Atomkraftwerk *Fukushima Daiichi* zu einem Ausfall der Notstromaggregate. In den folgenden Tagen kam es daraufhin zu mehreren Explosionen in drei Blöcken des Kernkraftwerks, die das Einsetzen der Kernschmelze zur Folge hatten. Dies führte zur Freisetzung großer Mengen an Radioaktivität in die Umwelt (Luft und Wasser).

Bislang ist noch nicht im Detail abzuschätzen, welche Auswirkungen diese Freisetzungen auf Mensch und Umwelt gehabt haben und noch weiter haben werden. Die in der Region hergestellten Lebensmittel werden langfristig stärker kontaminiert sein. Die Auswirkungen auf die küstennahe Meeresfauna sind noch nicht absehbar. In den betroffenen Regionen der Präfektur Fukushima sind erhöhte Risiken für bestimmte Krebsarten zu erwarten. Vom wissenschaftlichen Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen der atomaren Strahlung (UNSCEAR) wurde 2015 ein Folgebericht zur Fukushima-Katastrophe veröffentlicht, der auch auf die bisher bekannten gesundheitlichen Folgen eingeht. Eine Abbildung in Kap. 6.5.2 auf unserer Lehrbuch-Homepage vergleicht die Größe der Gebiete, die infolge der Katastrophen von Tschernobyl (1986) und Fukushima (2011) durch radioaktiven Fallout belastet wurden.

Sind Menschen kurzzeitig hohen Dosen ionisierender Strahlung ausgesetzt, führt dies zur **akuten Strahlenkrankheit**. Ab 0,2 Sv effektive Dosis treten Blutbildveränderungen auf, ab 0,5 Sv klagen die Betroffenen über Kopfschmerzen und ab einer effektiven Dosis von 1,2 Sv zeigt sich dann das Vollbild der akuten Strahlenkrankheit. Typisch hierfür sind in der akuten Phase Schwäche, Übelkeit und Erbrechen. Nach einer Erholungsphase von 1–2 Wochen (der Lebensdauer der Zellen des Knochenmarks und des Magen-Darm-Traktes) kommt es dann zu einer raschen Verschlechterung mit massivem Durchfall, Blutungen, Schleimhautgeschwüren, Haarausfall und Fieber. Bei Per-

sonen, die 1,2 Sv ausgesetzt waren, beträgt die Letalität ca. 10 %. Bei 2–6 Sv steigt sie dann auf 30–60 %. Noch höhere Dosen können nicht überlebt werden, die Letalität beträgt hier 100 %.

Grundsätzlich können nach einer Strahlenexposition überall im Körper **Tumore** entstehen. Gut belegt ist dieser Zusammenhang z. B. für den gesamten Magen-Darm-Trakt, für Schilddrüse, Lunge, Knochen, Haut, weibliche Brust, Gehirn und das blutbildende System (v. a. Leukämien, Lymphome). Die *Dosis-Wirkungs-Beziehung* ist bei den meisten Krebsarten linear. Dies gilt wahrscheinlich auch für niedrige Dosen. So erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, an einem soliden Tumor zu erkranken, pro 10 mSv um ca. 0,2 % (Männer) bzw. 0,3 % (Frauen). Höhere Risiken für die Entwicklung bösartiger Tumore werden bei Kindern beobachtet, deren Mütter in der Schwangerschaft abdominal geröntgt wurden oder die diagnostisch oder therapeutisch ionisierender Strahlung ausgesetzt waren. In Europa werden ca. 8–9 % der Lungenkrebstodesfälle (D: ca. 2.000–3.000 Personen/Jahr, CH: ca. 200–300 Personen/Jahr) auf die Exposition durch Radon zurückgeführt.

Ein erhöhtes Risiko nach einer hohen Strahlenexposition wurde auch für **andere Spätfolgen** wie Herz-Kreislauf- und Lungenerkrankungen nachgewiesen. Dies gilt insbesondere für Personen, die eine Strahlentherapie erhielten und damit einer sehr hohen Herz- bzw. Lungendosis ausgesetzt waren. Die Betroffenen leiden zudem häufiger an Sterilität oder Subfertilität. Viele Gesundheitsfolgen lassen sich erst heute dokumentieren, weil die oben genannten Kohorten nun das mittlere und späte Erwachsenenalter erreichen. Ionisierende Strahlung kann während der ersten Schwangerschaftswochen zu **teratogenen Schädigungen** führen. Hierunter versteht man Fehlbildungen (z. B. Mikrozephalie), deren Art abhängig ist vom Entwicklungszustand des Embryos zum Zeitpunkt der Einwirkung. Man geht davon aus, dass es ab ca. 100 mSv zu solchen Schäden kommen kann. Die Abschätzungen des Risikos für **genetische Strahlenschäden** beim Menschen beruht auf tierexperimentellen Untersuchungen. Bei den Nachkommen der Atombomben-Überlebenden konnten bisher kaum erhöhte Raten von vererbaren Erkrankungen festgestellt werden.

Gesetzgebung, Grenzwerte und Überwachung

In der Schweiz wird die maximal zulässige Strahlendosis durch die *Strahlenschutzverordnung* festgelegt. Der Grenzwert der künstlich zugeführten effektiven Dosis für die Allgemeinbevölkerung (ohne medizinische Anwendungen) beträgt 1 mSv/Jahr. Für beruflich strahlenexponierte Personen liegt er bei 20 mSv/Jahr. *Als beruflich strahlenexponiert* gilt, wer am Arbeitsplatz einer effektiven Dosis von mehr als 1 mSv/Jahr ausgesetzt sein kann oder regelmäßig in kontrollierten Zonen arbeitet bzw. ausgebildet wird. Hierzu gehören das Personal in Krankenhäusern, Arzt- und Zahnarztpraxen aber auch Personen, die in Forschung, Industrie oder Kernkraftwerken arbeiten. In der EU gelten auch Personen als strahlenexponiert, die erhöhter Strahlung aus natür-

lichen Quellen ausgesetzt sind. Damit gehören die Mitarbeiter der zivilen Luftfahrt ebenfalls zu den beruflich strahlenexponierten Personen. Nach der voraussichtlich ab 2018 in Kraft tretenden neuen Strahlenschutzverordnung wird dies dann auch für die Schweiz gelten.

In der Schweiz tragen über 90.000 beruflich exponierte Personen (Stand 2015, Dosimetriebericht) bei ihrer Arbeit persönliche Dosimeter, deren akkumulierte Dosis monatlich ermittelt und zentral vom *Bundesamt für Gesundheit* (BAG) erfasst wird. In Deutschland ist hierfür das Strahlenschutzregister beim *Bundesamt für Strahlenschutz* (BfS) in München zuständig. BAG und BfS betreiben automatische Messnetze, um sowohl kurzfristige Veränderungen (z. B. Strahlenunfälle) als auch die jährliche Gesamtexposition der Bevölkerung zu erfassen. Darüber hinaus werden kontinuierlich Proben von Aerosolen, Niederschlägen und fließenden Gewässern untersucht. Von Erde, Gras, Milch und Lebensmitteln werden in unregelmäßigen Abständen Stichproben entnommen. Ganzkörpermessungen zeigen die kumulative Aufnahme von Radionukliden über die Nahrung. Zusätzlich wird der ^{90}Sr -Gehalt in Milchzähnen und Wirbelknochen untersucht. Die so erstellten Messreihen zeigen seit Mitte der 1960er Jahre (d. h. seit dem Abbruch der oberirdischen Kernwaffenversuche durch die USA und die UDSSR) einen steten Abwärtstrend. Anders als in der Ukraine, Weißrussland und den angrenzenden Gebieten hat die Katastrophe von Tschernobyl 1986 diesen Abwärtstrend in Deutschland und der Schweiz nicht unterbrochen.

6.6 Lärm

Martin Rösli, Andreas Seidler, Hans-Peter Hutter

Schall durchdringt unser Leben. Er ist ein wichtiger Bestandteil des sozialen Miteinanders und gleichzeitig unerwünschter Abfall. Unser Körper ist in der Lage, Schall zu erzeugen und zu verarbeiten. Hierin besteht ein Unterschied zu vielen anderen Gefährdungen, die wir zu einem großen Teil nicht wahrnehmen können. Wir benötigen Schall zur Kommunikation, Orientierung und als Warnsignal. Ein Übermaß an Schall – bezogen auf Stärke und Dauer – beeinträchtigt jedoch nicht nur das subjektive Wohlbefinden, sondern kann zu nachhaltigen gesundheitlichen Schäden führen.

6.6.1 Definitionen und Maßeinheiten: Was sind Schall und Lärm?

Als **Schall** bezeichnet man die mit einem Messgerät registrierten Schalldruckschwankungen, quantifiziert als *Schalldruckpegel* (kurz Schallpegel, L_p). Dieser drückt das mit zehn multiplizierte logarithmische Verhältnis der von einer Schallquelle abgestrahlten Schallintensität I (gemessen in W/m^2) zur Bezugsintensität I_0 aus. Als Bezug

dient der leiseste Schalldruck, der von unserem Ohr wahrgenommen wird, die Hörschwelle ($I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$). Die Angabe erfolgt in logarithmischer Dezibel-Skala (dB). Daher kommt es bei einer Verdoppelung der Schallintensität (z. B. der Verwendung von zwei gleichen Lautsprechern) zu einem Anstieg des Schalldruckpegels um 3 dB ($10 \times \log_{10} 2$). Zehn gleiche Schallquellen erhöhen den Schalldruckpegel um 10 dB. Eine solche Anhebung des Schalldruckpegels wird von uns als annähernde Verdoppelung der subjektiv wahrgenommenen Lautstärke empfunden. Da der Mensch nicht alle Frequenzen gleich intensiv wahrnimmt, wird in Schallpegelmessern zusätzlich ein Filter eingesetzt, der die unterschiedliche Empfindlichkeit des menschlichen Ohres bei verschiedenen Frequenzen nachbildet. Diese *A-bewerteten Schallpegel* [in dB(A)] werden in Umweltforschung und Lärmgesetzgebung verwendet.

Bei der Messung von **Lärmpegeln** (s. Box 6.6.1) muss auch die Dauer der Beschallung berücksichtigt werden. Aus zeitlich schwankenden Schalldruckpegeln wird unter Beachtung der logarithmischen Gesetze ein Mittelwert gebildet [*Mittelungspegel* oder *äquivalenter Dauerschallpegel* (L_{Aeq})]. Übliche Mittelungszeiträume sind 24 Stunden ($L_{Aeq,24h}$), 16 Stunden für die Tageszeit ($L_{Aeq,16h}$) oder 8 Stunden für die Nachtzeit ($L_{Aeq,8h}$). In der Lärmpolitik spielen auch *zeitlich gewichtete Lärmindikatoren* wie der L_{DN} oder der L_{DEN} eine Rolle. Dabei steht DN für eine Tag-Nacht-Gewichtung (**Day-Night**), bei der nächtlicher Lärm (22.00–6.00 Uhr oder 23.00–7.00 Uhr) einen Zuschlag von 10 dB erhält. Bei DEN (**Day-Evening-Night**) erhält zusätzlich der abendliche Lärm (18.00–22.00 Uhr oder 19.00–23.00 Uhr) einen Zuschlag von 5 dB.

Box 6.6.1: Schall oder Lärm?

Obwohl die Begriffe Schall und Lärm umgangssprachlich oft synonym verwendet werden, stellen sie doch verschiedene Betrachtungsebenen dar. Lärm wird häufig auch als unerwünschter Schall bezeichnet. Damit wird deutlich, dass der Begriff *Schall* die rein physikalisch-akustische Komponente beschreibt, während *Lärm* auch die Wirkungsebene mit einbezieht. Auch gewollter Schall (z. B. laute Musik) kann allerdings körperliche Schäden hervorrufen. Weitergehende Definitionen bezeichnen Lärm daher als jegliche Schalleinwirkung, die belästigt, stört oder zu gesundheitlichen Schäden führen kann.

6.6.2 Lärmbelastung der Bevölkerung und Expositionsquellen

Die bedeutendste Quelle von Umweltlärm ist bei uns der motorisierte Verkehr auf Straßen, Schienen und in der Luft. Hinzu kommen Industrielärm (von Baustellen und Industrieanlagen) und Nachbarschaftslärm (s. Abb. 6.9). Nach Schätzungen der *Europäischen Umweltagentur EEA* (2014; auf der Basis der Daten von 2012) sind in ihren 33 Mitgliedstaaten insgesamt 130 Mio. Menschen regelmäßig Straßenverkehrslärm von $L_{DEN} = 55 \text{ dB}$ oder mehr ausgesetzt, 14 Mio. Menschen müssen entsprechenden Schienenverkehrslärm tolerieren und 4 Mio. Menschen leben mit regelmäßigem Flug-

Vorsicht Lärm!

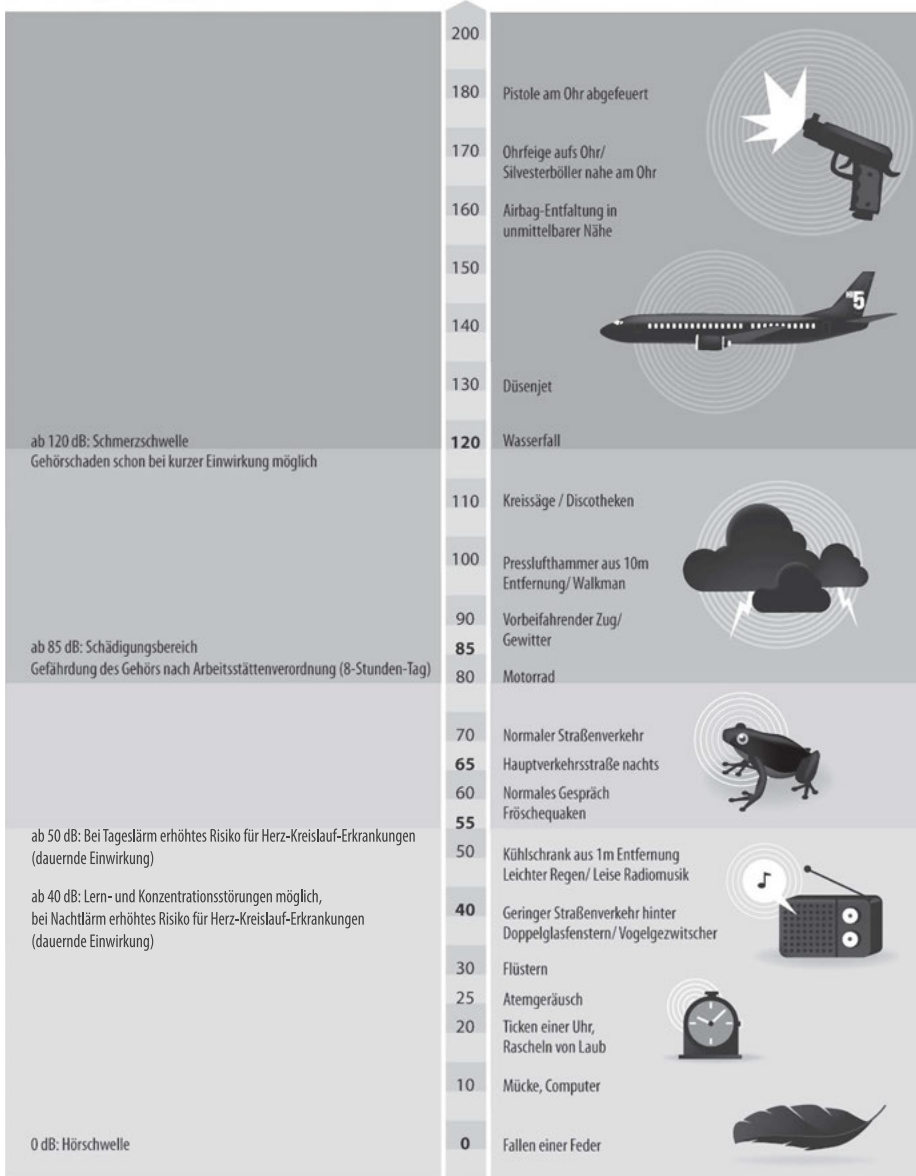


Abb. 6.9: Überblick über Schallpegel in unserer Umwelt und die damit verbundenen Gesundheitsrisiken.
(Zeichnung: Christoph Frei; nach einer Vorlage der Fa. OHROPAX GmbH, Wehrheim).

lärm von $L_{\text{DEN}} = 55$ dB oder mehr. In Deutschland sind nach Angaben des Umweltbundesamtes (2015) über 4,8 Mio. Menschen in Ballungsräumen, entlang von Hauptverkehrswegen und nahe von Großflughäfen nächtlichen Lärmpegeln von mehr als 55 dB ausgesetzt. Im gleichen Gebiet müssen fast 3,5 Mio. Menschen ganztägig mit Schallpegeln von ≥ 65 dB leben. In der Schweiz (2014; auf der Basis der Daten von 2010) leiden insgesamt 4,1 Mio. Menschen an Straßenlärm von ≥ 55 dB, 800.000 Menschen sind von entsprechenden Bahnlärm und 100.000 Menschen von Fluglärm ≥ 55 dB betroffen.

6.6.3 Gesundheitsfolgen

Effekte auf das Gehör

Bleibende Hörschäden entstehen nicht nur dann, wenn laute Geräusche, d. h. hohe Schallpegel kurzzeitig auf das Gehör einwirken, sondern auch durch eine Dauerschallbelastung bei niedrigeren Schallpegeln (Tages-Lärmexpositionspegel von 85 dB oder mehr). Hierbei kommt es infolge mangelhafter Energieversorgung zu einer langsamen Schädigung der Haarzellen im Innenohr. Die Betroffenen haben ein Gefühl wie Watte in den Ohren. Während akute Hörschäden meist sofort bemerkt werden (z. B. durch Hörsturz, Tinnitus, Hörminderung, dumpfen Höreindruck), werden die langsam entstehenden Hörschäden bei einer chronischen Lärmeinwirkung anfangs kaum wahrgenommen. Man unterschätzt daher oft die Gesundheitsgefahren, die z. B. durch laute Musik drohen.

Von kurzzeitigen Überlastungen kann sich unser Gehör in ruhigen Phasen wieder erholen. Ein vollständiger Verlust von Sinneszellen ist hingegen irreversibel. Lärm bedingter Hörverlust manifestiert sich insbesondere in dem für das gesunde Ohr empfindlichsten Bereich um 4 kHz (betroffen ist daher das Verstehen von Sprache, insbesondere von Zischlauten). Bei der Musik gehen die klangbestimmenden Obertöne verloren, was oft nicht sofort bemerkt wird. Ein solcher Hörverlust kann zusätzlich von Ohrgeräuschen (*Tinnitus*) begleitet sein. Hörgeräte sind in der Lage, größere Hörverluste z.T. auszugleichen, indem sie die aufgenommenen Geräusche verstärken. Der Höreindruck ist allerdings auch mit Hörgerät beeinträchtigt.

Die Ursachen für Hörschäden können sowohl im Arbeits- als auch im Freizeitbereich liegen. Beispiele sind laute Musik in Diskotheken und Konzerten, aber auch über Kopfhörer, nahe Explosionen von Feuerwerkskörpern, lautes Spielzeug oder Hobbys, die Lärm machen. Nach einer EU-Richtlinie dürfen MP3-Player und Smartphones ab 2012 nicht lauter als 85 dB sein.

Gesundheitsfolgen, die nicht das Gehör betreffen

Belästigung: Große Teile der Bevölkerung fühlen sich durch Verkehrslärm, insbesondere durch Straßenverkehrslärm erheblich beeinträchtigt. In Deutschland haben sich im Jahr 2014 rund 54 % der Menschen in ihrem Wohnumfeld durch Straßenverkehr gestört oder belästigt gefühlt. In der Schweiz (2014) fühlen sich 29 % der Bevölkerung zu Hause bei offenem Fenster durch Verkehrslärm „eher gestört“ oder „sehr gestört“. Die Lärmwirkungsforschung richtet hier ihr Augenmerk besonders auf hochgradig lärmbelästigte Menschen („highly annoyed“, s. Tab. 6.6). Meta-Analysen verschiedener internationaler Studien zeigen, dass Fluglärm bei gleichem Dauerschallpegel noch stärker belästigt als Straßen- oder Schienenverkehrslärm. Nach den Empfehlungen der WHO (s. *Community Noise Guidelines*) sollten zur Vermeidung erheblicher („serious“) Belästigungen Tages-Immissionspegel von 55 dB nicht überschritten werden.

Tab. 6.6: Lärmbelästigung der Bevölkerung in Deutschland (2011), unterschieden nach Geräuschquellen, Angaben in Prozent.

Grad der Belästigung	Überhaupt nicht belästigt	Etwas/mittel belästigt	Stark/äußerst belästigt
Ursache	%	%	%
Straßenverkehr	17,0	47,0	36,0
Sportanlagen	76,3	18,3	5,4
Flugverkehr	55,3	24,7	20,0
Industrie/Gewerbe	57,8	32,2	10,1
Schienenverkehr	58,6	29,9	11,5
Nachbarschaft	39,1	42,5	18,4
Gesamtlärmbelastung	12,5	46,3	41,2

Quelle: Auswertung der Online-Lärmumfrage des Umweltbundesamtes, 14.04.2011;
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3974.pdf>

Schlafstörungen: Regelmäßiger, ungestörter Schlaf ist wichtig für die körperliche und geistige Leistungsfähigkeit eines Menschen. Personen, die während des Schlafens Lärm ausgesetzt sind, zeigen im Schlaflabor deutliche körperliche Reaktionen (sog. *Arousal-Reaktionen* im EEG, Änderungen der Schlafstadien, Körperbewegungen sowie physiologische Reaktionen wie Blutdruck- und Herzfrequenzänderungen). Diese sind auch nachweisbar, wenn die Betroffenen sagen, dass sie der Lärm nicht stört oder sie sich nicht daran erinnern können. Es scheint auch keine vollständige körperliche Gewöhnung an den Lärm zu geben, da auch Personen, die schon lange in lärmbelasteten Gebieten wohnen, diese Reaktionen zeigen. Lärm verlängert darüber

hinaus die Einschlafzeiten und verkürzt die Gesamtschlafenszeiten. Auch die subjektive Bewertung der Schlafqualität fällt schlechter aus. Nach den *Night Noise Guidelines for Europe* der WHO zeigt nächtlicher Außenlärm (L_{night}) mit Mittelungspegeln bis 30 dB keine wesentlichen biologischen Auswirkungen. Bei Mittelungspegeln zwischen 30 und 40 dB werden besonders bei empfindlichen Personen Blutdruck- und Herzfrequenzänderungen sowie Aufwachreaktionen beobachtet. Zahlreiche epidemiologische Studien konnten zeigen, dass bereits Mittelungspegel von 40 bis 55 dB bei vielen Betroffenen zu negativen gesundheitlichen Auswirkungen führen. Ab 55 dB wird die Situation als gesundheitlich bedenklich eingestuft. Ein Großteil der Bevölkerung reagiert während des Schlafes darauf, das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen steigt an. Es wird daher empfohlen, dass die nächtliche Lärmbelastung außerhalb von Wohnungen (L_{night}) 40 dB nicht überschreiten sollte. Wo dies kurzfristig nicht erreichbar ist, sollte als Interimsziel ein Wert von 55 dB festgelegt werden.

Mentale Gesundheit, kognitive Leistungsfähigkeit: Bei Kindern mit dauerhafter Lärmexposition am Wohnort sind kognitive Leistungsfähigkeit und Schulleistungen beeinträchtigt. Darüber hinaus findet sich bei Erwachsenen ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Auftreten einer depressiven Episode und chronischer Lärmbelastung. Beides gilt insbesondere für Fluglärm (s. www.laermstudie.de/).

Herz-Kreislauf-Risiko: Am besten untersucht sind gesundheitliche Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System. Neue Studien – u. a. die große *NORAH-Fallkontrollstudie in Deutschland* – zeigen, dass das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen ab einer L_{DEN} -Exposition von 50 dB kontinuierlich ansteigt (vgl. Kap. 8.2). Dies gilt insbesondere für das Risiko, einen Herzinfarkt, einen Schlaganfall oder eine Herzinsuffizienz zu entwickeln. Sowohl akute Lärmereignisse als auch eine dauerhafte Lärmbelastung führen zu einer Erhöhung des Blutdrucks. Dies gilt insbesondere für nächtlichen Lärm. Man geht heute davon aus, dass die beobachteten Effekte auf das kardiovaskuläre System dadurch entstehen, dass Lärm als psychosozialer Stressor auf das sympathische Nervensystem und das Hormonsystem wirkt. In experimentellen und epidemiologischen Studien korrelierten ansteigende Lärmbelastungen (ab 55 dB) mit einer zunehmenden Kortisol-Ausschüttung. Hierbei scheint die individuelle Sensibilität eine große Rolle zu spielen. Menschen, die sich durch Lärm stärker gestört fühlen, erfahren auch einen größeren Stress.

6.6.4 Public-Health-Auswirkungen

Ökonomisch betrachtet spiegelt sich die Beeinträchtigung der Menschen durch Umweltlärm u. a. in den Miet- und Immobilienpreisen wider. Allerdings ist den meisten Menschen nicht bewusst, wie stark sich Lärm auf ihre Gesundheit auswirken kann. Die Gesundheitsfolgen von Lärm können dadurch abgeschätzt werden, dass die

Belastungssituation der Bevölkerung mit den Ergebnissen epidemiologischer Studien verglichen wird (Gesundheitsfolgenabschätzung, *Health Impact Assessment*). Die WHO hat in ihrem im Jahr 2011 erschienenen Bericht *Burden of Disease from Environmental Noise* die Gesamtlast gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch Umweltlärm für Westeuropa auf über 1 Mio. DALYs (*Disability-Adjusted Life Years*, s. Kap. 10.1.2) geschätzt. Hiervon sind 61.000 DALYs auf lärmbedingte ischämische Herzkrankheiten zurückzuführen, 45.000 DALYs auf kognitive Beeinträchtigungen bei Kindern, 22.000 auf Tinnitus, 903.000 auf Schlafstörungen und 654.000 auf Belästigung durch Umweltlärm. Die externen Kosten, die durch Verkehrslärm in der Schweiz (2010) entstehen, werden auf insgesamt 1,8 Mrd. CHF pro Jahr geschätzt.

6.6.5 Richtlinien und gesetzliche Regelungen

Bei lebenslanger täglicher Exposition wird ein äquivalenter Dauerschallpegel ($L_{Aeq,24h}$) von unter 70 dB als sicher für das Gehör eingestuft. Nach den EU-Arbeitsschutzrichtlinien müssen ArbeitnehmerInnen ab einer täglichen Lärmbelastung von 85 dB Gehörschutz benutzen (s. a. Kap. 6.2.3). Dennoch ist das Problem der arbeitsbedingten Lärmschwerhörigkeit noch keineswegs gelöst: Lärmbedingter Hörverlust ist in der Europäischen Union die am häufigsten gemeldete Berufskrankheit, in Deutschland stellt die Lärmschwerhörigkeit mit jährlich über 6.000 anerkannten Berufskrankheiten die mit großem Abstand häufigste anerkannte Berufskrankheit dar. In der Europäischen Union gilt darüber hinaus die *Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm* [Richtlinie 2002/49/EG] aus dem Jahr 2002. Sie hat zum Ziel, schädliche Auswirkungen von Umgebungslärm zu verhindern, ihnen vorzubeugen oder sie zu mindern.

In der Schweiz wird der Umweltlärm in der *Lärmschutz-Verordnung* (LSV) reguliert. Das Gesetz definiert maximale Immissionen, welche auf lärmempfindliche Bauten oder Gebiete einwirken dürfen. Der Immissionsgrenzwert in Wohnzonen liegt z. B. bei 60 dB während des Tages und bei 50 dB während der Nacht. Darüber hinaus regelt die *Schall- und Laserschutzverordnung* in der Schweiz die zulässigen Lärmemissionen für Freizeitveranstaltungen in Gebäuden.

In Deutschland werden die Grenzwerte für Lärm durch verschiedene Gesetze und Verordnungen festgelegt. So regelt z. B. die *Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz* (TA Lärm) die Grenzwerte für Lärm, der von Anlagen wie Betriebsstätten und technischen Einrichtungen ausgeht. Für reine Wohngebiete sind dort als Grenzen 50 bzw. 35 dB (Tag/Nacht) festgelegt. In Deutschland gibt es keine umfassende gesetzliche Regelung zum Schutz von Veranstaltungsbesuchern (z. B. in Diskotheken oder Konzerten) vor zu hohen Schalldruckpegel. Die DIN-Norm 15905, Teil 5, die einen Grenzwert von 99 dB für den halbstündigen Mittelungspegel angibt – gemessenen am lautesten Ort, der dem Publikum zugänglichen ist – hat bislang keine gesetzliche Verbindlichkeit.

In Österreich gibt es kein allgemeines Gesetz zum Schutz vor Lärm. Lärmschutz kann Thema in verschiedenen Rechtsbereichen sein (Querschnittsmaterie). Die Rechtsgrundlagen für die Lärmbekämpfung sind daher auf zahlreiche Gesetze und Verordnungen verteilt. Beispielsweise finden sich die Bestimmungen zu Lärmemissionen/-immissionen im Bundes-Umgebungs-lärmschutzgesetz, im Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz, in der Gewerbeordnung, der Bundesstraßen-Lärmimmissionsschutzverordnung und der Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung. Neben diesen gesetzlichen Vorgaben sind die Richtlinien des *Österreichischen Arbeitsrings für Lärmbekämpfung* (ÖAL) wesentliche Grundlagen im Lärmschutz bzw. in der Lärmbeurteilung. Beispiele hierfür sind die Richtlinien ÖAL 3 (Beurteilung von Schallimmissionen im Nachbarschaftsbereich, 2008) und ÖAL 6/18 (Die Wirkungen des Lärms auf den Menschen. Beurteilungshilfen für den Arzt, 2011).

Internet-Ressourcen

Auf unserer Lehrbuch-Homepage (**www.public-health-kompakt.de**) finden Sie Hinweise auf Literaturquellen und weiterführende Literatur, zusätzliche Abbildungen und Tabellen sowie Links zu themenrelevanten Studien und Institutionen.